УДК 517
ББК 22.16
И 46

Учебник удостоен
государственной премии СССР за 1980 год

ИЛЬИН В. А., ПОЗНЯК Э. Г. Основы математического анализа: В 2-х ч. Часть I: Учеб.: Для вузов. — 7-е изд. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. — 648 с. — (**Курс высшей математики и математической физики**). — ISBN 5-9221-0536-1.

Один из выпусков «Курса высшей математики и математической физики» под редакцией А.Н.Тихонова, В.А.Ильина, А.Г.Свешникова. Учебник создан на базе лекций, читавшихся авторами в течение ряда лет на физическом факультете и факультете вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета. Книга включает теорию вещественных чисел, теорию пределов и непрерывности функций, дифференциальное и интегральное исчисление функций одной переменной, теорию числовых рядов, дифференциальное исчисление многих переменных. Воспроизводится с 5-го изд. (1998 г.).

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Физика» и «Прикладная математика».

Ил. 117.

Учебное издание

ИЛЬИН Владимир Александрович,
ПОЗНЯК Эдуард Генрихович

ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Часть I

Серия «Курс высшей математики и математической физики»

Редактор *Д.А. Миртова*
Оригинал-макет: *Ст.Ю. Мельников*

ЛР №071930 от 06.07.99
Подписано в печать 01.09.04. Формат 60×90/16. Бумага офсетная №1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 40,5. Уч.-изд. л. 43,4. Заказ №

Издательская фирма «Физико-математическая литература»
МАИК «Наука/Интерпериодика»
117997 Москва, Профсоюзная ул., 90
E-mail: fizmat@maik.ru, fmlsale@maik.ru
http://www.fml.ru

Отпечатано с готовых диапозитивов
в ППП «Типография «Наука»
121099, Москва, Шубинский пер., 6



ISBN 5-9221-0536-1

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ К СЕДЬМОМУ ИЗДАНИЮ

Особенностью этого учебника, отличающей его от других учебников по математическому анализу, является концепция построения теории предельного значения и непрерывности функции только на основе определения предела функции по Гейне (через предел последовательности). При этом введение второго эквивалентного определения предела функции по Коши (на «ε–δ языке»), часто трудно воспринимаемого студентами первых курсов, откладывается до главы 8.

После многих лет преподавания математического анализа возникло намерение изменить указанную концепцию, что в последние годы воплощается при чтении лекционных курсов.

Однако многие математики, использующие этот учебник, в беседе со мной не советовали мне этого делать, убеждая меня в том, что тем самым я испорчу хорошо зарекомендовавший себя учебник.

Учитывая это мнение и тот факт, что эта книга рекомендована Ученым Советом МГУ к изданию в серии «Классический университетский учебник», приуроченный к 250-летию МГУ, я решил сохранить в этом издании указанную концепцию изложения.

Сентябрь 2004 г. *В. А. Ильин*

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЯТОМУ ИЗДАНИЮ

Первая часть «Основ математического анализа» в настоящем издании повторяет текст четвертого переработанного и дополненного издания, которое содержит целый ряд улучшающих и углубляющих изложение изменений, возникших в результате чтения одним из авторов лекций на факультете вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета.

Наиболее существенные из этих изменений относятся к изложению приближенных методов вычисления определенных интегралов, к выводу формулы Тейлора с остаточным членом в форме Пеано (как в одномерном, так и в многомерных случаях), к теории отыскания локальных экстремумов и точек перегиба графика функции, к изложению градиентного метода поиска экстремума сильно выпуклой функции.

Со времени выхода в свет первого издания книга стала основным учебником во многих вузах и университетах. Несмотря на то, что общий тираж предыдущих изданий превысил 240 тысяч экземпляров, книга превратилась в библиографическую редкость. В целях ускорения выпуска книги текст пятого издания перепечатывается стереотипно с четвертого издания.

Июнь 1998 г. *В. А. Ильин*

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

В основу настоящей книги положены лекции, читавшиеся авторами на физическом факультете МГУ в течение ряда лет.

При написании книги авторы стремились к систематичности изложения и к выделению важнейших понятий и теорем. Теоремы, играющие особо важную роль, в тексте названы основными. Авторы стремились также не формулировать новых понятий и теорем задолго до их непосредственного использования.

Порядок расположения материала в книге соответствует установившемуся на физическом факультете МГУ плану чтения курса лекций. В частности, изложению систематического курса в настоящей книге предшествует глава 1 — «Предварительные сведения об основных понятиях математического анализа». В этой главе рассматриваются некоторые важные физические задачи и обсуждаются математические средства, необходимые для их решения. Таким путем выясняется тот круг вопросов и понятий, с которым придется иметь дело в курсе математического анализа. Опыт чтения лекций показывает, что такое предварительное выяснение вопросов, которым посвящен курс анализа, существенно облегчает студентам усвоение абстрактных математических понятий.

Возросшая роль вычислительной математики и приближенных методов также нашла свое отражение в книге. Именно поэтому авторы стремились там, где это возможно, к алгоритмичности изложения доказательств теорем и проводимых вычислений. В частности, в гл. 12 в первую очередь подчеркнута алгоритмическая сторона приближенных методов вычислений и лишь затем дано обоснование этих методов.

Кроме основного материала, авторы сочли возможным включить в книгу некоторые дополнительные вопросы, напечатанные мелким шрифтом.

При написании этой книги авторы использовали некоторые методические приемы из курса лекций Н. В. Ефимова и из известных книг Э. Гурса, Ш. Ж. Валле-Пуссена и Ф. Франклина.

Авторы считают своим приятным долгом выразить глубокую благодарность А. Н. Тихонову за многие ценные идеи и указания и огромную помощь, оказанную на всех этапах написания этой книги.

Авторы также глубоко благодарны И. А. Шишмарёву, работа которого по редактированию этой книги способствовала значительному ее улучшению.

Авторы искренне благодарят Н. В. Ефимова, Л. Д. Кудрявцева и особенно А. А. Самарского за большое количество методических предложений, Б. М. Будака и С. В. Фомина за просмотр отдельных глав и сделанные ими замечания, Б. Химченко, П. Заикина и А. Золотарева за помощь при подготовке рукописи к печати.

1965 г. *В. Ильин, Э. Позняк*

ГЛАВА 1

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОСНОВНЫХ ПОНЯТИЯХ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

§ 1. Математические понятия, возникающие при описании движения

1. Математика изучает количественные отношения и пространственные формы окружающего нас мира.

Элементарная математика ограничивается лишь первоначальным изучением количественных отношений и пространственных форм, ибо она имеет дело в основном с *постоянными величинами* и с простейшими геометрическими фигурами (треугольниками, окружностями и т. п.). Понятий и методов элементарной математики оказывается недостаточно для описания механического движения и других протекающих во времени процессов. Выясним, какие новые математические понятия необходимы для этого [1]).

2. Со всяким процессом связано представление о *переменной величине* , т. е. о такой величине, которая в условиях данного процесса принимает различные значения. Более того, всякий процесс характеризуется по меньшей мере двумя переменными величинами, *изменение которых взаимосвязано.*

Рассмотрим, например, механическое движение материальной точки по прямой линии. Это движение представляет собой процесс изменения положения точки на прямой линии с течением времени. С указанным процессом связаны две переменные величины — время и путь, пройденный точкой от начала отсчета. Для характеристики рассматриваемого движения нужно

---

[1]) При этом мы не будем стремиться к точным формулировкам, а постараемся лишь выяснить тот круг вопросов, с которым нам в дальнейшем придется иметь дело.

знать, на каком расстоянии от начала отсчета находится точка в каждый данный момент времени, т. е. нужно знать *зависимость пути, пройденного точкой, от времени.* В механике такую зависимость называют *законом движения.* Иными словами, закон движения представляет собой правило, посредством которого каждому значению времени x ставится в соответствие определенное значение пути y, пройденного точкой за время x.

Такого рода зависимости между двумя переменными x и y, при которых каждому значению переменной x ставится в соответствие определенное значение переменной y, встречаются не только при рассмотрении механического движения материальной точки, но и при описании других физических процессов. Абстрагируясь от конкретного физического содержания переменных x и y, мы приходим к одному из важнейших математических понятий — *понятию функции*[1]).

Если известно правило, посредством которого каждому значению переменной x ставится в соответствие определенное значение переменной y, то говорят, что переменная y является функцией переменной x.

При этом переменная x называется *аргументом* рассматриваемой функции, а соответствующее данному x значение переменной y называется *частным значением* функции в точке x.

Для обозначения функции используются следующие символы:

$$y = y(x) \qquad \text{или} \qquad y = f(x).$$

В последнем обозначении буква f, называемая характеристикой функции, символизирует указанное выше правило. Если рассматриваются разные функции, то для обозначения их характеристик употребляются разные буквы. Подчеркнем, что для обозначения аргумента и функции вовсе не обязательно употреблять буквы x и y. Например, запись $S = h(t)$ означает, что переменная S является функцией аргумента t, причем характеристика этой функции обозначена буквой h.

Как переменная величина, так и функция обычно характеризуются различными *численными значениями.* Поэтому углубление представлений об этих понятиях тесно связано с необходимостью развития теории вещественных чисел[2]).

---

[1]) Введение в математику понятия функции связывают с именем великого английского ученого И. Ньютона (1642–1727).

[2]) Следует отметить, что понятие функции и понятие числа относятся к так называемым *начальным понятиям.* Каждое из начальных понятий может быть разъяснено, но всякая попытка дать определение начального понятия сводится к замене определяемого понятия ему эквивалентным. С начальными понятиями читатель знаком из элементарного курса. К начальным понятиям относятся, например, понятия прямой линии и плоскости.

Рассмотрим несколько примеров функций.

1) Известно, что путь S, пройденный первоначально неподвижной материальной точкой при падении под действием силы тяжести за время t определяется формулой

$$S = gt^2/2.$$

Эта формула и представляет собой правило, посредством которого каждому значению переменной t ставится в соответствие значение переменной S, т. е. определяет S как функцию аргумента t.

2) По закону Кулона два разноименных единичных заряда, находящихся на расстоянии r друг от друга, притягиваются с силой

$$F = c/r^2,$$

где c — некоторая константа. Эта формула также представляет собой правило, посредством которого каждому значению переменной r ставится в соответствие значение переменной F, т. е. определяет F как функцию аргумента r.

В указанных двух примерах правило сопоставления аргумента и функции задавалось *при помощи формулы*. Такой способ задания функции называется *аналитическим*.

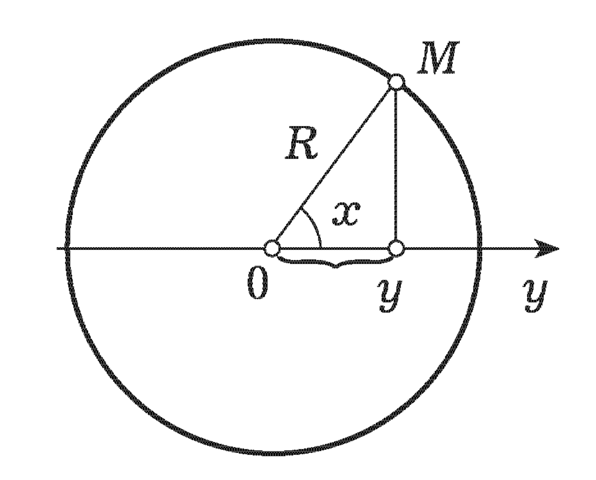


Рис. 1.1

Наряду с этим способом существуют и другие способы задания функции. Отметим некоторые из них. В практике физических измерений весьма употребителен *табличный способ* задания функции, при котором выписываются в виде таблицы значения аргумента и соответствующие им значения функции. Часто зависимость между аргументом и функцией задается посредством графика, который, например, снимается на осциллографе. Такой способ задания функции называется *графическим* [1]).

3. Потребности физики иногда приводят к необходимости изучения функции $y = f(x)$, аргумент x которой сам представляет собой некоторую функцию $x = \varphi(t)$ нового аргумента t. В таком случае говорят, что y представляет собой *сложную функцию аргумента* t, а x называют *промежуточным* аргументом. Эту сложную функцию можно записать в следующем виде: $y = f[\varphi(t)]$.

Рассмотрим следующий пример.

Пусть материальная точка M равномерно вращается по окружности радиуса R с угловой скоростью ω (рис. 1.1). Най-

[1]) Подробнее о способах задания функции см. гл. 4.

дем закон движения проекции y этой точки на некоторую ось Oy, лежащую в плоскости окружности и проходящую через ее центр O. При этом будем считать, что в момент времени $t = 0$ точка M находится на оси Oy. Обозначим через y координату рассматриваемой проекции на оси Oy, а через x угол $\angle MOy$. Очевидно, что $y = R\cos x$. С другой стороны, поскольку точка движется по окружности с угловой скоростью ω и в момент времени $t = 0$ находится на оси Oy, то $x = \omega t$. Таким образом, y представляет собой *сложную функцию аргумента* t: $y = R\cos x$, где $x = \omega t$, или $y = R\cos\omega t$. Заметим, что движение по закону $y = R\cos\omega t$ в механике называют *гармоническим колебанием.*

§ 2. Мгновенная скорость и связанные с ней новые математические понятия

1. Пусть функция $y = f(x)$ представляет собой закон движения материальной точки по оси Oy. Для характеристики движения важную роль играет понятие *средней скорости*. Вычислим среднюю скорость $v_{\text{ср}}$ движущейся точки за промежуток времени от x до $x + \Delta x$, где x — фиксированный момент времени, Δx — некоторое приращение времени. Поскольку в момент времени x движущаяся точка находится на расстоянии $f(x)$ от начала отсчета, а в момент времени $x + \Delta x$ — на расстоянии $f(x + \Delta x)$, то путь Δy, пройденный точкой за время Δx, равен $\Delta y = f(x + \Delta x) - f(x)$. Поэтому средняя скорость $v_{\text{ср}}$ равна

$$v_{\text{ср}} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}.$$

Так как момент времени x фиксирован, то из последней формулы видно, что $v_{\text{ср}}$ является функцией аргумента Δx. Для характеристики неравномерного движения, наряду со средней скоростью, большую роль играет понятие *мгновенной скорости* в данный момент времени x.

Мгновенной скоростью (или просто *скоростью*) в момент времени x называется число, к которому приближается значение средней скорости

$$v_{\text{ср}} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x},$$

когда промежуток времени Δx стремится к нулю.

Физическое понятие мгновенной скорости является источником важного математического понятия *производной*. Абстрагируясь от конкретного физического смысла функции $y = f(x)$, мы будем называть *производной* этой функции в фиксированной точке x предел, к которому стремится дробь $\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}$ при Δx, стремящемся к нулю.

Операцию нахождения производной принято называть *дифференцированием*. Производная функции $y = f(x)$ в данной фиксированной точке обозначается символом $y'(x)$ или $f'(x)$. Используя известный символ для обозначения предела, можно записать

$$f'(x) = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}.$$

Рассмотрим некоторые примеры.

1) Вычислим мгновенную скорость материальной точки, падающей под действием силы тяжести. Поскольку закон движения этой точки определяется функцией $S = gt^2/2$, то путь ΔS, пройденный точкой за промежуток времени от t до $t + \Delta t$, равен

$$\Delta S = \frac{g(t + \Delta t)^2}{2} - \frac{gt^2}{2} = gt\,\Delta t + \frac{g}{2}(\Delta t)^2.$$

Поэтому средняя скорость за тот же промежуток времени равна

$$v_{\text{ср}} = \frac{\Delta S}{\Delta t} = gt + \frac{g}{2}\Delta t.$$

Следовательно, мгновенная скорость v в фиксированный момент времени t равна

$$v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \left(gt + \frac{g}{2}\Delta t\right) = gt.$$

Фактически мы вычислили производную функции $S = gt^2/2$, так что мы можем записать $S' = gt$.

2) Вычислим производную функции $y = x^n$, где n — целое положительное число. Фиксируя x и беря произвольное Δx, получим, используя бином Ньютона,

$$\Delta y = (x + \Delta x) - x^n = nx^{n-1}\Delta x + \frac{n(n-1)}{2}x^{n-2}(\Delta x)^2 + \cdots + (\Delta x)^n.$$

Поэтому средняя скорость $\dfrac{\Delta y}{\Delta x}$ изменения функции $y = f(x)$ на участке от x до $x + \Delta x$ равна

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = nx^{n-1} + \frac{n(n-1)}{2}x^{n-2}(\Delta x) + \cdots + (\Delta x)^{n-1}.$$

Следовательно, производная в данной фиксированной точке x равна

$$y' = \lim_{\Delta x \to 0}\left[nx^{n-1} + \frac{n(n-1)}{2}x^{n-2}(\Delta x) + \cdots + (\Delta x)^{n-1}\right] = nx^{n-1}.$$

Мы видим, что для вычисления производных фундаментальную роль играет понятие предела функции. Уточнение этого понятия в первую очередь связано с необходимостью более детального выяснения самого понятия функции, переменной величины и вещественного числа.

2. Сейчас мы убедимся, что в процессе вычисления производных простейших функций возникают новые математические вопросы.

Займемся вычислением производной функции $y = \sin x$. Фиксируя x и беря произвольное Δx, получим

$$\Delta y = \sin(x + \Delta x) - \sin x = 2\cos\left(x + \frac{\Delta x}{2}\right)\sin\frac{\Delta x}{2}.$$

Отсюда

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \cos\left(x + \frac{\Delta x}{2}\right)\frac{\sin(\Delta x/2)}{(\Delta x/2)}.$$

Таким образом, для вычисления производной функции $y = \sin x$ в точке x нужно найти следующий предел:

$$\lim_{\Delta x\to 0}\frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta x\to 0}\left[\cos\left(x + \frac{\Delta x}{2}\right)\frac{\sin(\Delta x/2)}{(\Delta x/2)}\right]. \tag{1.1}$$

Естественно ожидать, что при фиксированном x

$$\lim_{\Delta x\to 0}\cos\left(x + \frac{\Delta x}{2}\right) = \cos x. \tag{1.2}$$

Однако не всякая функция $y = f(x)$ обладает свойством

$$\lim_{\Delta x\to 0} f\left(x + \frac{\Delta x}{2}\right) = f(x).$$

Фактически это свойство означает, что когда аргумент функции стремится к числу x, то соответствующее значение этой функции стремится к числу $f(x)$. Функции, обладающие таким свойством, называются *непрерывными* (в точке x). Понятие *непрерывности* функции является одним из важнейших математических понятий.

Для вычисления предела (1.1), кроме предела (1.2), нужно вычислить еще предел

$$\lim_{\Delta x\to 0}\frac{\sin(\Delta x/2)}{(\Delta x/2)}. \tag{1.3}$$

Этот предел играет важную роль в математическом анализе. Его часто называют *первым замечательным пределом*. Доказывается, что этот предел равен единице, и поэтому предел (1.1) равен $\cos x$.

Итак,

$$(\sin x)' = \cos x.$$

В качестве второго примера вычислим производную функции $y = \log_a x$. Фиксируя $x > 0$ и беря произвольное Δx (такое, что $x + \Delta x > 0$), получим

$$\Delta y = \log_a(x + \Delta x) - \log_a x = \log_a\left(1 + \frac{\Delta x}{x}\right).$$

Отсюда

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{1}{\Delta x}\log_a\left(1+\frac{\Delta x}{x}\right) = \frac{1}{x}\left[\frac{x}{\Delta x}\log_a\left(1+\frac{\Delta x}{x}\right)\right] = \frac{1}{x}\log_a\left[\left(1+\frac{\Delta x}{x}\right)^{\frac{x}{\Delta x}}\right].$$

Таким образом, для вычисления производной функции $y = \log_a x$ к в точке x нужно найти предел

$$\lim_{\Delta x\to 0}\frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta x\to 0}\frac{1}{x}\log_a\left[\left(1+\frac{\Delta x}{x}\right)^{\frac{x}{\Delta x}}\right]. \qquad (1.4)$$

Рассмотрим предел при $x \to 0$ выражения, стоящего в квадратных скобках. Он сводится к пределу

$$\lim_{h\to 0}[(1+h)^{1/h}] \quad \left(\text{при} \quad h = \frac{\Delta x}{x}\right).$$

Этот предел также играет важную роль в математическом анализе. Его часто называют *вторым замечательным пределом.* Доказывается, что этот предел существует. Следуя Эйлеру [1], число, равное этому пределу, обозначают буквой e [2], т. е.

$$\lim_{h\to 0}[(1+h)^{1/h}] = e. \qquad (1.5)$$

Вернемся к вычислению предела (1.4). Аргументом логарифма в формуле (1.4) служит величина $\left[\left(1+\frac{\Delta x}{x}\right)^{\frac{x}{\Delta x}}\right]$, стремящаяся, согласно (1.5), к e при $\Delta x \to 0$. Если логарифмическая функция непрерывна, то $\log_a\left[\left(1+\frac{\Delta x}{x}\right)^{\frac{x}{\Delta x}}\right]$ стремится к $\log_a e$ при $\Delta x \to 0$. Таким образом, для нахождения предела (1.4) нужно обосновать непрерывность логарифмической функции и использовать предел (1.5). Предполагая, что это сделано, мы получим, что предел (1.4) равен $\frac{1}{x}\log_a e$. Итак,

$$(\log_a x)' = \frac{1}{x}\log_a e.$$

Здесь мы не будем вычислять производных других простейших элементарных функций: $y = \cos x$, $y = \operatorname{tg} x$, $y = \operatorname{ctg} x$, $y = \arcsin x$, $y = \arccos x$, $y = \operatorname{arctg} x$, $y = \operatorname{arcctg} x$, $y = a^x$ и $y = x^\alpha$, где α — любое число. При вычислении производных этих функций не возникает никаких новых трудностей, кроме указанных

[1] Леонард Эйлер (1707–1783) — великий математик, член Петербургской Академии наук, большую часть жизни провел в России, по происхождению швейцарец.

[2] В § 16 гл. 8 будет указан способ вычисления числа e с любой степенью точности. Там же приведен результат вычисления числа e на электронно-вычислительной машине с точностью до 590 знаков после запятой.

выше. Именно, для вычисления производных всех простейших элементарных функций потребуется лишь их непрерывность и два замечательных предела.

Приведем таблицу производных простейших элементарных функций:

1°. $(x^\alpha)' = \alpha x^{\alpha-1}$, α — любое число.

2°. $(\log_a x)' = \dfrac{1}{x}\log_a e$, в частности, если $a = e$, то $(\log_e x)' = \dfrac{1}{x}$.

3°. $(a^x)' = a^x \log_e a$, в частности, если $a = e$, то $(e^x)' = e^x$.

4°. $(\sin x)' = \cos x$.

5°. $(\cos x)' = -\sin x$.

6°. $(\operatorname{tg} x)' = \dfrac{1}{\cos^2 x}$.

7°. $(\operatorname{ctg} x)' = -\dfrac{1}{\sin^2 x}$.

8°. $(\arcsin x)' = \dfrac{1}{\sqrt{1-x^2}}$.

9°. $(\arccos x)' = -\dfrac{1}{\sqrt{1-x^2}}$.

10°. $(\operatorname{arctg} x)' = \dfrac{1}{1+x^2}$.

11°. $(\operatorname{arcctg} x)' = -\dfrac{1}{1+x^2}$.

3. Для вычисления производных широкого класса функций следует присоединить к указанной выше таблице производных *правило дифференцирования сложной функции*, а также *правила дифференцирования суммы, разности, произведения и частного функций*. Сформулируем правило дифференцирования сложной функции $y = f(x)$, где $x = \varphi(t)$.

Для нахождения производной $y'(t)$ сложной функции $y = f[\varphi(t)]$ по аргументу t в данной точке t следует: 1) *вычислить производную $\varphi'(t)$ функции $x = \varphi(t)$ в точке t;* 2) *вычислить производную $f'(x)$ функции $y = f(x)$ в точке x, где $x = \varphi(t)$;* 3) *перемножить указанные производные.* Таким образом, производная сложной функции $y = f[\varphi(t)]$ может быть найдена по формуле $y'(t) = f'(x)\varphi'(t)$. Следующие рассуждения разъясняют сформулированное правило. Придадим аргументу t в точке t произвольное приращение $\Delta t \neq 0$. Этому приращению соответствует приращение $\Delta x = \varphi(t + \Delta t) - \varphi(t)$ функции $x = \varphi(t)$. Полученному приращению Δx соответствует приращение $\Delta y = f(x + \Delta x) - f(x)$ функции $y = f(x)$ в точке x. Опуская случай $\Delta x = 0$, рассмотрим отношение

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta y}{\Delta x}\frac{\Delta x}{\Delta t}.$$

Поскольку $\lim\limits_{\Delta t\to 0}\dfrac{\Delta x}{\Delta t}=\varphi'(t)$, $\lim\limits_{\Delta t\to 0}\dfrac{\Delta y}{\Delta x}=f'(x)$ и из существования первого из этих пределов ясно, что при $\Delta t\to 0$ и $\Delta x\to 0$ [1]), то $\lim\limits_{\Delta t\to 0}\dfrac{\Delta y}{\Delta t}$ существует и равен $f'(x)\varphi'(t)$, т. е. $y'(t)=f'(x)\varphi'(t)$.

Приведем теперь правила дифференцирования суммы, разности, произведения и частного (в предположении, что $u(x)$ и $v(x)$ имеют производные):

$$[u(x)\pm v(x)]'=u'(x)\pm v'(x),$$
$$[u(x)v(x)]'=u(x)v'(x)+u'(x)v(x),$$
$$\left[\frac{u(x)}{v(x)}\right]'=\frac{u'(x)v(x)-u(x)v'(x)}{v^2(x)}.$$

Покажем, например, как можно вывести вторую из этих формул. Придадим аргументу x произвольное приращение $\Delta x\neq 0$, которому соответствует приращение Δy функции $y=u(x)v(x)$

$$\Delta y=u(x+\Delta x)v(x+\Delta x)-u(x)v(x)=$$
$$=u(x+\Delta x)[v(x+\Delta x)-v(x)]+v(x)[u(x+\Delta x)-u(x)]=$$
$$=u(x+\Delta x)\Delta v+v(x)\Delta u.$$

Таким образом,

$$\frac{\Delta y}{\Delta x}=u(x+\Delta x)\frac{\Delta v}{\Delta x}+v(x)\frac{\Delta u}{\Delta x}.$$

Так как существуют пределы $\lim\limits_{\Delta x\to 0}\dfrac{\Delta u}{\Delta x}=u'(x)$ и $\lim\limits_{\Delta x\to 0}\dfrac{\Delta v}{\Delta x}=$ $=v'(x)$ и из существования первого из этих пределов ясно, что $\lim\limits_{\Delta x\to 0}u(x+\Delta x)=u(x)$, то $\lim\limits_{\Delta x\to 0}\dfrac{\Delta y}{\Delta x}$ существует и равен $u(x)v'(x)+v(x)u'(x)$.

Рассмотрим несколько примеров применения указанных правил.

1) Вычислим производную функции $y=cu(x)$, где c — некоторая постоянная. Легко проверить, что производная постоянной равна нулю. Поэтому по формуле дифференцирования произведения получим $[cu(x)]'=cu'(x)$.

2) Вычислим производную функции $y=\operatorname{tg}x$. Так как $\operatorname{tg}x=$ $=\dfrac{\sin x}{\cos x}$, то по формуле дифференцирования частного получим

$$(\operatorname{tg}x)'=\frac{(\sin x)'\cos x-\sin x(\cos x)'}{\cos^2 x}=\frac{1}{\cos^2 x}.$$

[1]) Если знаменатель дроби, имеющей предел, стремится к нулю, то и числитель этой дроби стремится к нулю.

3) Вычислим производную функции, описывающей гармонические колебания, $y = A\cos(\omega t + \delta)$, где A, ω и δ — постоянные. Будем рассматривать эту функцию как сложную функцию вида $y = A\cos x$, где $y = \omega t + \delta$. По правилу дифференцирования сложной функции получим

$$y'(t) = (A\cos x)'(\omega t + \delta)' = -(A\sin x)\omega,$$

где $x = \omega t + \delta$. Поэтому

$$y'(t) = -A\omega\sin(\omega t + \delta).$$

4) Вычислим производную функции $y = a^{\operatorname{arctg} t}$. Будем рассматривать эту функцию как сложную функцию вида $y = a^x$, где $x = \operatorname{arctg} t$. По правилу дифференцирования сложной функции получим

$$y'(t) = (a^x)'(\operatorname{arctg} t)' = (a^x \log_e a)\left(\frac{1}{1+t^2}\right),$$

где $x = \operatorname{arctg} t$. Поэтому

$$(a^{\operatorname{arctg} t})' = \frac{a^{\operatorname{arctg} t}\log_e a}{1+t^2}.$$

Сформулированные выше правила дифференцирования и таблица производных представляют собой основной аппарат той части математического анализа, которую обычно называют *дифференциальным исчислением*. Таким образом, одной из важных задач дифференциального исчисления является обоснование всех формул таблицы производных и правил дифференцирования суммы, разности, произведения, частного и сложной функции.

4. Выясним геометрический смысл производной. С этой целью рассмотрим график функции $y = f(x)$ [1] (рис. 1.2). Пусть точка M на графике функции соответствует фиксированному значению аргумента x, а точка P — значению $x + \Delta x$, где Δx — некоторое приращение аргумента. Прямую MP будем называть *секущей*. Обозначим через $\varphi(\Delta x)$ угол, который образует эта секущая с осью Ox (очевидно, что этот угол зависит от Δx). *Касательной к графику функции $y = f(x)$ в точке M будем называть предельное положение секущей MP при стремлении точки P к точке M по графику (или, что то же самое, при $\Delta x \to 0$).* Из рис. 1.2 ясно, что

$$\operatorname{tg}\varphi(\Delta x) = \frac{PN}{MN} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x}.$$

Так как при $\Delta x \to 0$ секущая MP переходит в касательную, то

$$\lim_{\Delta x \to 0} \operatorname{tg}\varphi(\Delta x) = \operatorname{tg}\varphi_0,$$

[1] Графиком функции $y = f(x)$ называется геометрическое место точек плоскости, для каждой из которых ордината есть значение y этой функции, соответствующее абсциссе x.

где φ_0 — угол, который образует касательная с осью Ox. С другой стороны,

$$\lim_{\Delta x \to 0} \operatorname{tg} \varphi(\Delta x) = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} = f'(x).$$

Следовательно, $f'(x) = \operatorname{tg} \varphi_0$. Тангенс угла наклона прямой к оси Ox называют *угловым коэффициентом* этой прямой. Таким образом, *производная* $f'(x)$ *равна угловому коэффициенту касательной к графику функции* $y = f(x)$ *в точке* M.

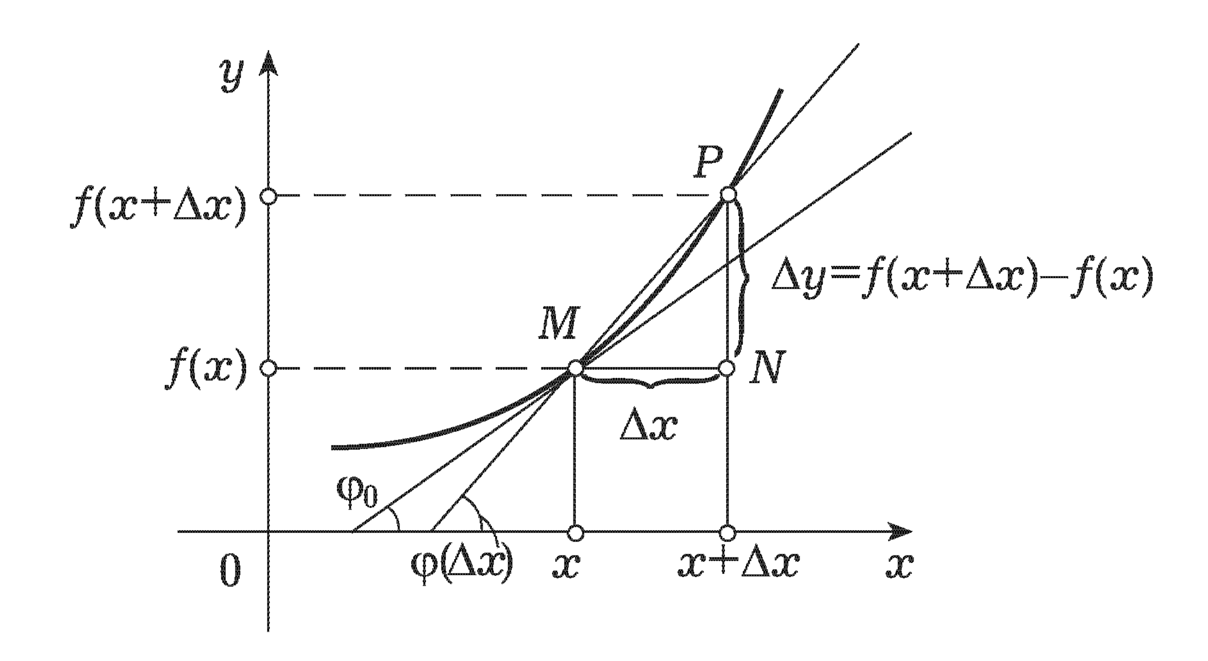


Рис. 1.2

§ 3. Задача о восстановлении закона движения по скорости и связанная с ней математическая проблематика

Рассмотрим следующую физическую задачу. Пусть для любого момента времени x задана мгновенная скорость $f(x)$ движущейся по оси Oy материальной точки и известно положение y_0 этой точки в начальный момент времени $x = x_0$. Требуется найти закон движения этой точки.

Поскольку мгновенная скорость $f(x)$ является производной функции $y = F(x)$, определяющей закон движения материальной точки по оси Oy, то задача сводится к разысканию по данной функции $f(x)$ такой функции $F(x)$, производная $F'(x)$ которой равна $f(x)$.

Отвлекаясь от конкретного физического смысла функций $f(x)$ и $F(x)$, мы придем к математическим понятиям *первообразной и неопределенного интеграла. Первообразной функции* $f(x)$ *называется такая функция* $F(x)$, *производная* $F'(x)$ *которой равна* $f(x)$.

Очевидно, что если функция $F(x)$ является первообразной функции $f(x)$, то и функция $F(x) + C$, где C — любая постоянная, также является первообразной функции $f(x)$ (ибо производная постоянной C равна нулю).

Можно доказать, что две любые первообразные одной и той же функции $f(x)$ отличаются на постоянную. Таким образом, если функция $F(x)$ является одной из первообразных функции $f(x)$, то *любая первообразная* функции $f(x)$ имеет вид $F(x) + C$, где C — постоянная.

Совокупность всех первообразных одной и той же функции $f(x)$ называется неопределенным интегралом от функции $f(x)$ и обозначается символом $\int f(x)\,dx$.

Следовательно, если $F(x)$ — одна из первообразных функции $f(x)$, то

$$\int f(x)\,dx = F(x) + C.$$

Вернемся к решению поставленной выше физической задачи. Интересующий нас закон движения точки, имеющей мгновенную скорость $f(x)$, определяется функцией $y = F(x) + C$, где $F(x)$ — некоторая первообразная функции $f(x)$, а C — некоторая постоянная. Для определения постоянной C воспользуемся тем, что $y = y_0$ в начальный момент времени $x = x_0$, т. е. $y_0 = F(x_0) + C$, откуда $C = y_0 - F(x_0)$. Таким образом, интересующий нас закон движения имеет вид

$$y = F(x) + y_0 - F(x_0).$$

Рассмотрим некоторые физические и математические примеры.

1) Пусть мгновенная скорость материальной точки, движущейся по оси Oy, имеет вид $f(x) = \cos x$. Требуется найти закон движения этой точки, если в начальный момент времени $x = x_0$ точка занимает положение $y = y_0$ на оси Oy. Из таблицы производных ясно, что одной из первообразных функции $f(x) = \cos x$ является функция $F(x) = \sin x$. Следовательно, искомый закон движения имеет вид $y = \sin x + C$.

Из условия $y = y_0$ при $x = x_0$ находим $C = y_0 - \sin x_0$, т. е. окончательно получим закон движения в виде

$$y = \sin x + y_0 - \sin x_0.$$

2) Найти $\displaystyle\int \frac{1}{1+x^2}\,dx$. Из таблицы производных ясно, что одной из первообразных функции $f(x) = \dfrac{1}{1+x^2}$ является функция $F(x) = \operatorname{arctg} x$. Следовательно,

$$\int \frac{1}{1+x^2}\,dx = \operatorname{arctg} x + C.$$

В предыдущем параграфе мы выписали таблицу производных элементарных функций. Учитывая, что каждая формула

$F'(x) = f(x)$ этой таблицы приводит к соответствующей формуле $\int f(x)\,dx = F(x) + C$, мы получим следующую таблицу неопределенных интегралов:

$$1^\circ.\ \int x^\alpha\,dx = \frac{x^{\alpha+1}}{\alpha+1} + C \qquad (\alpha \neq -1).$$

$$2^\circ.\ \int \frac{dx}{x} = \log_e |x| + C.$$

$$3^\circ.\ \int a^x dx = \frac{a^x}{\log_e a} + C.$$

$$4^\circ.\ \int \sin x\,dx = -\cos x + C.$$

$$5^\circ.\ \int \cos x\,dx = \sin x + C.$$

$$6^\circ.\ \int \frac{dx}{\cos^2 x} = \operatorname{tg} x + C.$$

$$7^\circ.\ \int \frac{dx}{\sin^2 x} = -\operatorname{ctg} x + C.$$

$$8^\circ.\ \int \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = \arcsin x + C.$$

$$9^\circ.\ \int \frac{dx}{1+x^2} = \operatorname{arctg} x + C.$$

Эта таблица вместе с правилами интегрирования (которые здесь не приводятся) представляет собой важный вычислительный аппарат той части математического анализа, которую обычно называют *интегральным исчислением.*

Однако для вычисления многих неопределенных интегралов этого аппарата оказывается недостаточно. Возникает проблема о существовании первообразной (и неопределенного интеграла) у произвольной функции $f(x)$, непрерывной в каждой точке x. В следующем параграфе мы укажем другой подход к задаче об интегрировании функции, который позволяет решить эту проблему.

Здесь же мы сразу отметим, что существуют непрерывные (в каждой точке x) функции (например, $y = \cos x^2$), первообразные которых существуют, но не могут быть представлены с помощью конечного числа операций сложения, вычитания, умножения, деления и образования сложных функций от простейших элементарных функций, перечисленных нами в п. 2 § 2.

§ 4. Проблемы, возникающие при решении задачи о вычислении пути

1. Пусть функция $f(x)$ представляет собой скорость движения материальной точки по оси Oy. Для простоты будем считать, что все значения функции $f(x)$ неотрицательны. Требуется

вычислить путь, пройденный материальной точкой за промежуток времени от $x = a$ до $x = b$.

Для решения задачи [1] разобьем рассматриваемый промежуток времени на малые промежутки, ограниченные моментами $a = x_0 < x_1 < x_2 < \cdots < x_n = b$. Естественно считать, что на каждом промежутке от x_{k-1} до x_k скорость $f(x)$ меняется мало. Поэтому приближенно эту скорость можно считать на указанном промежутке постоянной и равной, например, $f(x_k)$. В таком случае путь, пройденный материальной точкой за время $\Delta x_k = x_k - x_{k-1}$, приближенно равен $f(x_k)\Delta x_k$, а путь S_a^b, пройденный точкой за время от a до b, приближенно равен

$$S_a^b \approx f(x_1)\Delta x_1 + f(x_2)\Delta x_2 + \cdots + f(x_n)\Delta x_n. \tag{1.6}$$

Естественно ожидать, что при уменьшении всех промежутков времени Δx_k мы будем получать все более и более точное значение пути S_a^b. Точное значение пути S_a^b мы получим, перейдя в сумме (1.6) к пределу при стремлении всех Δx_k к нулю (при этом, конечно, число слагаемых в сумме (1.6) будет неограниченно возрастать). Употребляя символ предела, мы можем записать следующую формулу:

$$S_a^b = \lim_{\Delta x_k \to 0} [f(x_1)\Delta x_1 + f(x_2)\Delta x_2 + \cdots + f(x_n)\Delta x_n]. \tag{1.7}$$

При этом вопрос о том, что мы понимаем под пределом написанной суммы, конечно, требует выяснения. Тем самым мы еще раз убеждаемся в необходимости углубления и развития понятия предела. В математике предел (1.7) называется *определенным интегралом* от функции $f(x)$ в пределах от a до b и обозначается символом

$$S_a^b = \int_a^b f(x)\,dx.$$

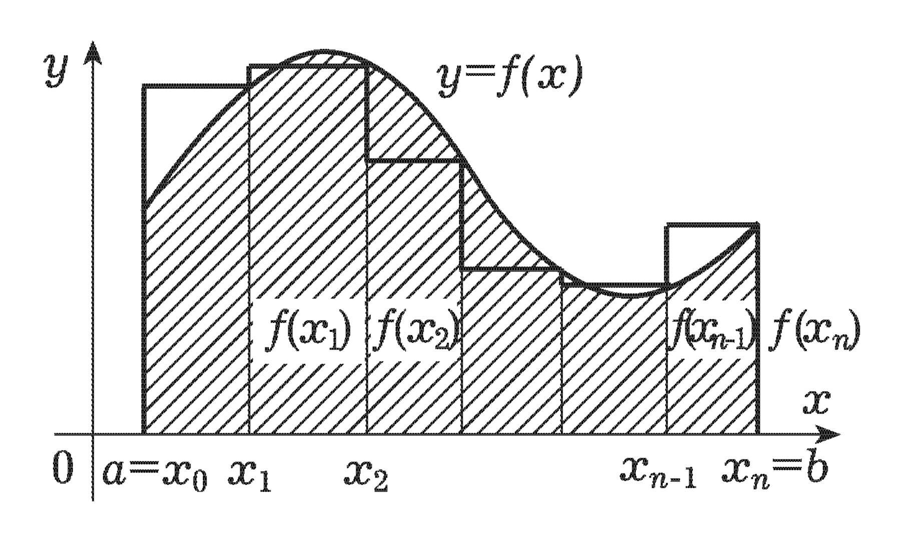


Рис. 1.3

Сумма (1.6) представляет собой сумму площадей прямоугольников, основаниями которых служат отрезки Δx_k а высотами $f(x_k)$. Иными словами, эта сумма равна площади изображенной на рис. 1.3 ступенчатой фигуры (эта ступенчатая фигура на чертеже обведена жирной линией). Естественно ожидать, что при стремлении к нулю длин всех отрезков Δx_k площадь указанной ступенчатой фигуры будет стремиться к площади заштрихован-

[1] Связь этой задачи с задачей, рассмотренной в предыдущем параграфе, будет выяснена ниже.

ной на чертеже криволинейной фигуры, лежащей под графиком функции $y = f(x)$ на отрезке от a до b. Эту криволинейную фигуру часто называют *криволинейной трапецией*. Таким образом, определенный интеграл равен площади указанной криволинейной трапеции.

Конечно, проведенные нами рассуждения носят предварительный характер. В частности, требует выяснения само понятие площади криволинейной трапеции и вообще площади плоской фигуры.

2. Мы видим, что с понятием определенного интеграла тесно связаны две важные задачи: физическая задача о вычислении пути и геометрическая задача о вычислении площади плоской фигуры. В связи с этим является важным вопрос о способах вычисления определенного интеграла.

Обозначим через $F(x)$ определенный интеграл от функции $f(x)$ в пределах от a до x, т. е. положим

$$F(x) = \int_a^x f(x)\,dx.$$

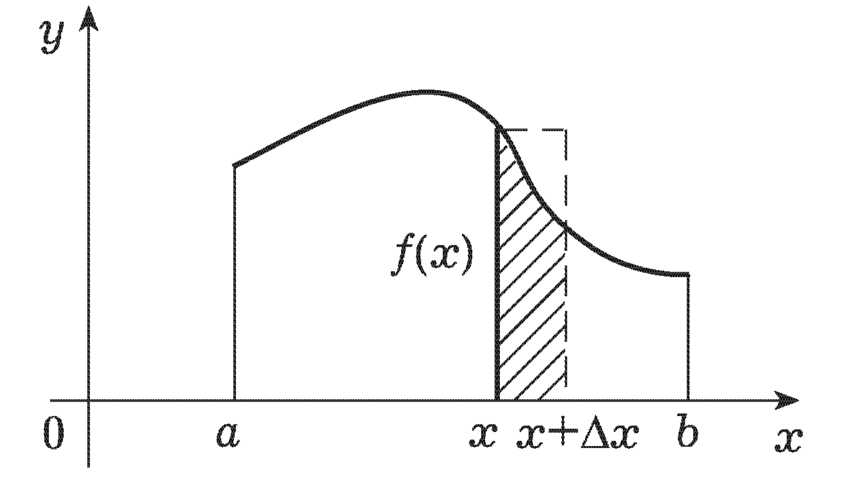


Рис. 1.4

С геометрической точки зрения, этот интеграл равен площади криволинейной трапеции, лежащей под графиком функции $y = f(x)$ на отрезке от a до x. На рис. 1.4 эта трапеция обведена жирной чертой. Используя наглядные геометрические соображения, покажем, что введенная функция $F(x)$ является одной из первообразных функции $f(x)$, т. е. убедимся в том, что $F'(x) = f(x)$. Пусть Δx — некоторое приращение аргумента x. Очевидно, разность $F(x + \Delta x) - F(x)$ равна площади заштрихованной на рис. 1.4 «узкой» криволинейной трапеции. Площадь этой трапеции при малом Δx мало отличается от площади $f(x)\Delta x$ прямоугольника с основанием Δx и высотой $f(x)$. Отсюда ясно, что при малом Δx отношение

$$\frac{F(x + \Delta x) - F(x)}{\Delta x} \tag{1.8}$$

мало отличается от высоты $f(x)$ указанного выше прямоугольника. Так как предел при $\Delta x \to 0$ дроби (1.8) равен производной $F'(x)$, то $F'(x) = f(x)$. Итак, функция $F(x)$ является одной из первообразных функции $f(x)$. Следовательно, *любая* первообразная $\Phi(x)$ функции $f(x)$ имеет вид

$$\Phi(x) = F(x) + C = \int_a^x f(x)\,dx + C. \tag{1.9}$$

Конечно, приведенные рассуждения и вытекающая из них формула (1.9) справедливы, вообще говоря, не для всякой функции $f(x)$. Нетрудно убедиться в справедливости формулы (1.9) для любой непрерывной (в каждой точке x) функции $f(x)$. Тем самым установление формулы (1.9) решает проблему существования первообразной (и неопределенного интеграла) у любой непрерывной в каждой точке x функции $f(x)$.

Установим теперь с помощью той же формулы (1.9) связь между определенным интегралом $\int\limits_a^b f(x)\,dx$ и любой первообразной $\Phi(x)$ функции $f(x)$. Полагая в формуле (1.9) последовательно $x = a$ и $x = b$ и учитывая очевидное из наглядных геометрических соображений равенство

$$\int\limits_a^a f(x)\,dx = 0,$$

получим

$$\Phi(a) = \int\limits_a^a f(x)\,dx + C = C, \qquad \Phi(b) = \int\limits_a^b f(x)\,dx + C.$$

Поэтому

$$\int\limits_a^b f(x)\,dx = \Phi(b) - \Phi(a). \tag{1.10}$$

Формула (1.10) является одной из основных формул интегрального исчисления и называется *формулой Ньютона–Лейбница* [1]). Эта формула сводит вопрос о вычислении определенного интеграла к вопросу о вычислении первообразной (или неопределенного интеграла). Обоснование формулы Ньютона–Лейбница является одной из важных задач математического анализа. Для приближенного вычисления определенных интегралов существует ряд способов, простейший из которых основан на замене этого интеграла суммой (1.6). Эти способы и соотношение (1.9) дают возможность приближенно вычислять и неопределенные интегралы, и, в частности, позволяют вычислить первообразную любой непрерывной (в каждой точке x) функции $f(x)$.

В качестве примера вычислим площадь S_1, заключенную между графиком функции $y = \sin x$ на отрезке от 0 до π и осью Ox (рис. 1.5) [2]). В силу сказанного выше $S_1 = \int\limits_0^\pi \sin x\,dx$.

---

[1]) Готфрид Вильгельм Лейбниц — немецкий философ и математик (1646–1716).

[2]) Вычисление этой площади средствами элементарной математики приводит к большим трудностям.

Так как одной из первообразных функции $f(x) = \sin x$ является функция $\Phi(x) = -\cos x$, то по формуле (1.10) получим

$$S_1 = \int_0^\pi \sin x\, dx = (-\cos\pi) - (-\cos 0) = 2.$$

Вычислим теперь площадь S_2 фигуры, отсекаемой от параболы $y = x^2$ прямой, проходящей через две точки $M_1(a, a^2)$ и $M_2(b, b^2)$ этой параболы (рис. 1.6) [1]. Искомая площадь S_2 равна разности площадей прямолинейной трапеции AM_1M_2B и заштрихованной на чертеже криволинейной трапеции, т. е.

$$S_2 = \frac{(b^2+a^2)(b-a)}{2} - \int_a^b x^2 dx = \frac{(b^2+a^2)(b-a)}{2} - \frac{b^3-a^3}{3} = \frac{(b-a)^3}{6}.$$

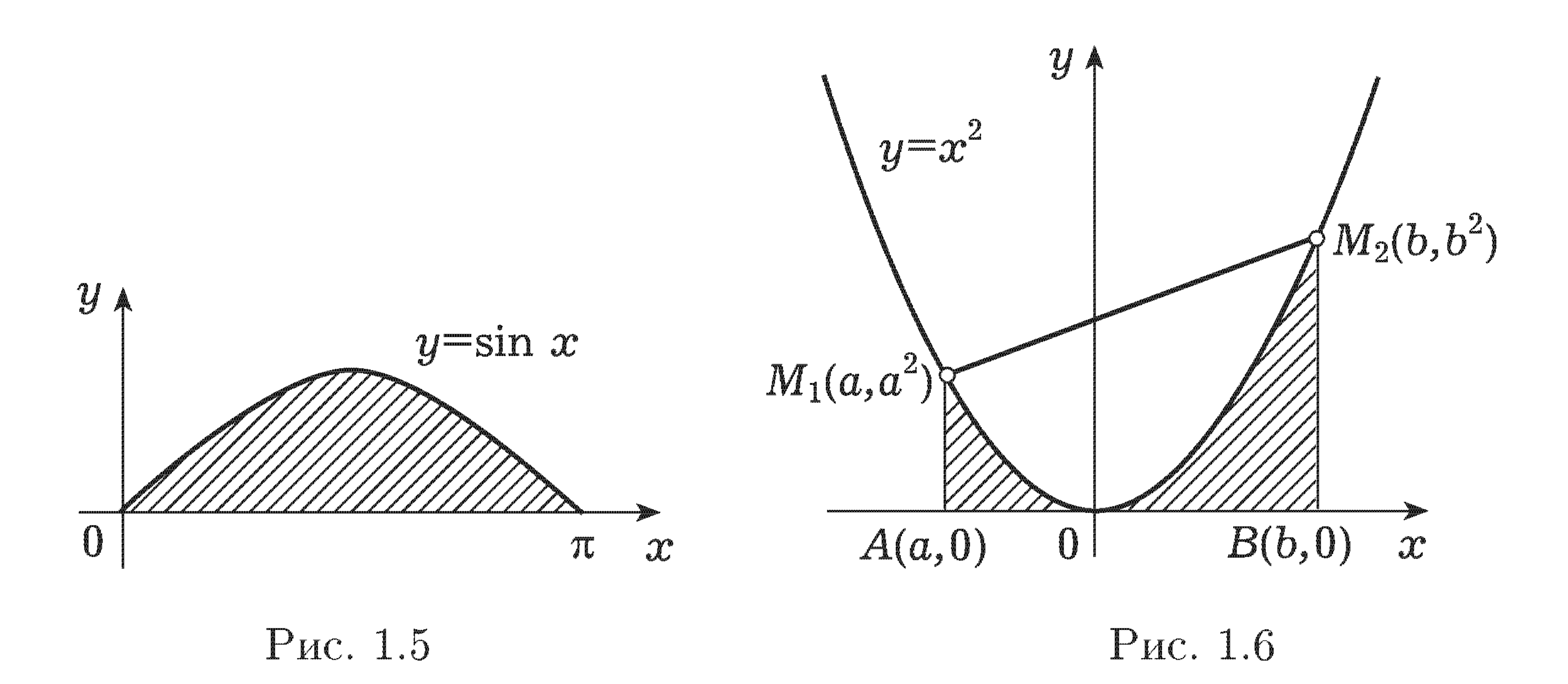


Рис. 1.5 Рис. 1.6

§ 5. Заключительные замечания

Дифференциальное и интегральное исчисления составляют основу математического анализа, создание которого является одним из величайших достижений человеческого разума. Введение в математику понятий переменной величины и функции позволило перейти от решения отдельных разрозненных физических и геометрических задач к созданию общих методов решения этих задач. Развитие дифференциального и интегрального исчислений оказало огромное влияние на общий прогресс науки и техники.

Дальнейший прогресс науки и техники тесно связан с математизацией наших представлений о природе, с развитием но-

[1]) Эта задача средствами элементарной математики была решена великим древнегреческим ученым Архимедом (III в. до н. э.).

вых направлений в математике. Можно с уверенностью сказать, что математизация наших представлений, точная количественная формулировка закономерностей, широкое использование вычислительных методов и электронно-вычислительных машин (ЭВМ) составляют основной стержень современного естествознания.

Внедрение вычислительных методов и использование ЭВМ, как правило, снимают вопросы трудоемкости и сложности вычислений [1]). При этом возникает целая серия математических проблем, к числу которых относятся вопросы разработки алгоритмов [2]) вычислений, служащих источником составления программ для ЭВМ, разработка проблем теории управления, теории оптимальных процессов, математической логики и теоретической кибернетики.

Наша дальнейшая задача будет заключаться в построении аппарата математического анализа. Мы рассмотрим также и некоторые приложения этого аппарата к разработке численных алгоритмов.

Проведенное выше предварительное рассмотрение ставит перед нами следующие первоочередные вопросы:

1. Уточнение понятий вещественного числа, переменной величины и функции.

2. Определение и развитие понятия предела функции и связанного с ним понятия непрерывности функции.

3. Обоснование формул и правил дифференциального и интегрального исчислений.

4. Построение теории определенного интеграла как предела сумм специального вида и развитие методов вычисления определенного интеграла.

5. Выяснение некоторых геометрических понятий (площади плоской фигуры, длины дуги и т. д.).

---

[1]) Современные ЭВМ в несколько минут производят вычисления, для проведения которых человеку потребовалась бы целая жизнь.

[2]) Алгоритм (или алгорифм) — система вычислений, выполняемых по строго определенным правилам, приводящая после какого-либо числа шагов к решению поставленной задачи.

ГЛАВА 2

ТЕОРИЯ ВЕЩЕСТВЕННЫХ ЧИСЕЛ

Из элементарного курса читатель имеет представление о вещественных числах и о том, что они необходимы, например, для измерения отрезков и промежутков времени. Для углубления наших представлений о важнейших математических понятиях — понятиях переменной величины, функции и предела — требуется дальнейшее развитие теории вещественных чисел.

Рассмотрим, например, физическую переменную величину — время. Для сравнения между особой различных промежутков времени нам необходимо уметь сравнивать между собой вещественные числа. Иными словами, мы должны установить правило, позволяющее выяснить, какое из двух данных вещественных чисел является большим. Практика последовательных измерений времени приводит к необходимости определения операций сложения и умножения вещественных чисел и выяснения свойств этих операций. Отметим также, что выяснение основных свойств вещественных чисел необходимо для обоснования применимости к этим числам правил элементарной алгебры.

§ 1. Вещественные числа

1. Свойства рациональных чисел. Напомним, что рациональным числом называется число, представимое в виде отношения двух целых чисел [1]. Из элементарного курса известны определения операций сложения и умножения рациональных чисел, правило сравнения этих чисел и их простейшие свойства. Здесь мы перечислим основные свойства рациональных чисел, вытекающие из соответствующих свойств целых чисел.

Фундаментальную роль среди свойств играют три правила:

---

[1]) Одно и то же рациональное число представимо в виде отношения различных целых чисел. Например, $\frac{1}{2} = \frac{2}{4} = \frac{3}{6} = \ldots$

правило сравнения и правила образования суммы и произведения.

I. *Любые два рациональных числа a и b связаны между собой одним и только одним из трех знаков $>, <$ или $=$, причем если $a > b$, то $b < a$.* Иными словами, *существует правило, позволяющее установить, каким из указанных трех знаков связаны два данных рациональных числа.* Это правило называется правилом сравнения[1]).

II. *Существует правило, посредством которого любым двум рациональным числам a и b ставится в соответствие определенное рациональное число c, называемое их суммой и обозначаемое символом $c = a + b$*[2]).

Операция нахождения суммы называется сложением.

III. *Существует правило, посредством которого любым двум рациональным числам a и b ставится в соответствие определенное рациональное число c, называемое их произведением и обозначаемое символом $c = ab$*[3]).

Операция нахождения произведения называется умножением.

Перечислим теперь основные свойства, которым подчинены указанные три правила.

Правило сравнения рациональных чисел обладает следующим свойством:

1° *из $a > b$ и $b > c$ вытекает, что $a > c$* (свойство транзитивности знака $>$); *из $a = b$ и $b = c$ вытекает, что $a = c$* (свойство транзитивности знака $=$).

Правило сложения рациональных чисел обладает, следующими свойствами:

2° $a + b = b + a$ (переместительное свойство);

3° $(a + b) + c = a + (b + c)$ (сочетательное свойство);

4° *существует рациональное число 0 такое, что $a + 0 = a$ для любого рационального числа a* (особая роль нуля);

---

[1]) Правило сравнения рациональных чисел формулируется так: два неотрицательных рациональных числа $a = \dfrac{m_1}{n_1}$ и $b = \dfrac{m_2}{n_2}$ связаны тем же знаком, что и два целых числа $m_1 n_2$ и $m_2 n_1$; два неположительных рациональных числа a и b связаны тем же знаком, что и два неотрицательных числа $|b|$ и $|a|$; если a — неотрицательное, а b — отрицательное рациональное число, то $a > b$.

[2]) Правило образования суммы рациональных чисел $a = \dfrac{m_1}{n_1}$ и $b = \dfrac{m_2}{n_2}$ определяется посредством формулы $\dfrac{m_1}{n_1} + \dfrac{m_2}{n_2} = \dfrac{m_1 n_2 + m_2 n_1}{n_1 n_2}$.

[3]) Правило образования произведения рациональных чисел определяется посредством формулы $\dfrac{m_1}{n_1} \dfrac{m_2}{n_2} = \dfrac{m_1 m_2}{n_1 n_2}$.

5° *для каждого рационального числа a существует противоположное ему число a' такое, что $a + a' = 0$.*

Правило умножения рациональных чисел обладает следующими свойствами:

6° $ab = ba$ (переместительное свойство);

7° $(ab)c = a(bc)$ (сочетательное свойство);

8° *существует рациональное число* 1 *такое, что* $a \cdot 1 = a$ *для любого рационального числа* a (особая роль единицы);

9° *для каждого рационального числа a, отличного от нуля, существует обратное ему число a' такое, что $aa' = 1$.*

Правила сложения и умножения связаны следующим свойством:

10° $(a+b)c = ac+bc$ (распределительное свойство умножения относительно суммы).

Следующие два свойства связывают знак $>$ со знаком сложения и умножения:

11° *из $a > b$ вытекает, что $a + c > b + c$;*

12° *из $a > b$ и $c > 0$ вытекает, что $ac > bc$.*

Особая роль принадлежит последнему свойству:

13° *каково бы ни было рациональное число a, можно число* 1 *повторить слагаемым столько раз, что полученная сумма превзойдет a* [1]).

Перечисленные 13 свойств обычно называют **основными свойствами** рациональных чисел, ибо все другие алгебраические свойства этих чисел, относящиеся к арифметическим действиям и к сочетанию равенств и неравенств, могут быть извлечены как следствие из указанных основных свойств.

Так, например, из этих свойств вытекает часто используемое в дальнейшем свойство, позволяющее почленно складывать неравенства одного знака:

если $a > b$ и $c > d$, то $a + c > b + d$.

В самом деле, из неравенств $a > b$ и $c > d$ и из свойств 11° и 2° вытекает, что $a + c > b + c$ и $b + c > b + d$, а из последних неравенств и из свойства 1° вытекает, что $a + c > b + d$.

2. Об измерении отрезков числовой оси. Из элементарного курса известно, что два отрезка могут быть соизмеримыми (когда отношение их длин выражается рациональным числом) и несоизмеримыми (примером несоизмеримых отрезков могут служить диагональ и сторона квадрата).

Удобно сразу же ввести в рассмотрение числовую ось. *Числовой осью* мы будем называть прямую, на которой выбраны определенная точка O (начало отсчета), масштабный отрезок OE

---

[1]) Это свойство часто называют *аксиомой Архимеда.*

(длину его мы считаем равной единице) и положительное направление (обычно от O к E).

Естественно, возникает задача о возможности поставить в соответствие каждой точке M числовой оси некоторое число, выражающее длину отрезка OM. Это число мы будем считать положительным, если M и E лежат по одну сторону от O, и отрицательным — в противном случае.

Прежде всего заметим, что *каждому рациональному числу соответствует на числовой оси определенная точка.* В самом деле, из элементарного курса известно, как построить отрезок, длина которого составляет $\frac{1}{n}$ часть длины масштабного отрезка OE (n — любое целое положительное число). Стало быть, мы можем построить отрезок AB, длина которого относится к длине масштабного отрезка OE, как $\frac{m}{n}$, где m и n — любые целые положительные числа. Считая, что точка E лежит правее точки O (рис. 2.1) и отложив отрезок AB вправо (влево) от точки O, мы получим точку $M_1(M_2)$, соответствующую рациональному числу $+\frac{m}{n}\left(-\frac{m}{n}\right)$.

$M_2\left(-\frac{m}{n}\right)$ 0 E $M_1\left(\frac{m}{n}\right)$

Рис. 2.1

Вместе с тем существование несоизмеримых отрезков позволяет утверждать, что *не все точки числовой оси соответствуют рациональным числам.*

Естественно, возникает потребность расширить область рациональных чисел и ввести в рассмотрение такие числа, которые соответствовали бы всем точкам числовой оси и позволяли бы измерить при помощи масштабного отрезка OE любой отрезок.

a_0 a_1
0 E N P M

Рис. 2.2

Мы опишем специальный процесс измерения отрезка OM числовой оси и покажем, что этот процесс *позволяет поставить в соответствие любой точке M этой оси некоторую вполне определенную бесконечную десятичную дробь.*

Пусть M — любая точка числовой оси. Ради определенности предположим, что M (как и E) лежит правее точки O (рис. 2.2).

Будем измерять отрезок OM при помощи масштабного отрезка OE. Прежде всего выясним, сколько раз целый отрезок OE укладывается в отрезке OM. Могут представиться два случая:

1. Отрезок OE укладывается в отрезке OM целое число a_0 раз с некоторым остатком NM, меньшим OE (см. рис. 2.2). В

этом случае целое число a_0 представляет собой приближенный результат измерения *по недостатку* с точностью до единицы.

2. Отрезок OE укладывается в отрезке OM целое число $a_0 + 1$ раз без остатка. В этом случае число a_0 также представляет собой приближенный результат измерения *по недостатку* с точностью до единицы, ибо отрезок OE укладывается в отрезке OM a_0 раз с остатком NM, равным OE[1]).

Выясним теперь, сколько раз $\frac{1}{10}$ часть масштабного отрезка OE укладывается в остатке NM. Снова могут представиться два случая.

1) $\frac{1}{10}$ часть отрезка OE укладывается в отрезке NM целое число a_1 раз с некоторым остатком PM, меньшим $\frac{1}{10}$ части отрезка OE (см. рис. 2.2). В этом случае рациональное число a_0, a_1 представляет собой результат измерения *по недостатку* с точностью до $\frac{1}{10}$.

2) $\frac{1}{10}$ часть отрезка OE укладывается в отрезке NM целое число $a_1 + 1$ раз без остатка. В этом случае рациональное число a_0, a_1 также представляет собой результат измерения *по недостатку* с точностью до $\frac{1}{10}$, ибо $\frac{1}{10}$ часть OE укладывается в отрезке NM a_1 раз с остатком PM, равным $\frac{1}{10}$ части OE.

Продолжая неограниченно указанные рассуждения, мы придем к бесконечной совокупности рациональных чисел:

$$a_0;\ \ a_0,\ \ a_1;\ \ldots;\ \ a_0,\ \ a_1 a_2 \ldots a_n;\ldots, \tag{2.1}$$

каждое из которых представляет собой результат измерения отрезка OM *по недостатку* с соответствующей степенью точности. Вместе с тем каждое из чисел (2.1) может быть получено посредством обрывания на соответствующем знаке *бесконечной десятичной дроби*

$$a_0,\ \ a_1 a_2 \ldots a_n \ldots \tag{2.2}$$

Указанные выше рассуждения применимы и для случая, когда точка M лежит левее точки O, только в этом случае все числа (2.1) и бесконечная десятичная дробь (2.2) будут иметь отрицательный знак.

[1]) Конечно, на практике во втором случае процесс измерения считают законченным и полагают длину отрезка OM равной $a_0 + 1$. Однако нам удобнее (в целях единообразия) вести измерения строго по недостатку, чтобы и в этом случае получить остаток NM и иметь возможность продолжать процесс измерения.

Таким образом, мы установили, что *посредством описанного нами процесса измерения отрезка OM любой точке M числовой оси можно поставить в соответствие вполне определенную бесконечную десятичную дробь.*

Итак, мы видим, что описанный выше процесс измерения произвольного отрезка OM числовой оси при помощи масштабного отрезка естественным образом приводит нас к рассмотрению *чисел, представимых в виде бесконечных десятичных дробей.* Вместе с тем каждая бесконечная десятичная дробь (2.2) полностью характеризуется бесконечной совокупностью (2.1) рациональных чисел, приближающих эту дробь. Конечно, описанный выше процесс измерения отрезка OM можно видоизменить так, что он будет приводить к рассмотрению бесконечных двоичных дробей или к рассмотрению бесконечных дробей в любой другой системе счисления.

Заметим, что для задания чисел в современных электронных вычислительных машинах наиболее часто используется двоичная система счисления, а иногда — троичная система счисления. Это объясняется тем, что входящие в конструкцию электронных машин радиолампы и полупроводниковые элементы имеют чаще всего два, а иногда три устойчивых состояния (например, лампа закрыта, ток не идет — одно устойчивое состояние; лампа открыта, ток идет — другое устойчивое состояние; третье устойчивое состояние возникает, если различать направление, в котором идет ток).

В связи с отмеченным обстоятельством возникает необходимость в разработке алгоритмов перевода чисел из десятичной системы счисления в двоичную систему и обратного перевода чисел из двоичной системы в десятичную. Примеры таких алгоритмов читатель найдет в Дополнении 1 к настоящей главе.

3. Вещественные числа и правило их сравнения. *Рассмотрим множество всевозможных бесконечных десятичных дробей. Числа, представимые этими дробями, будем называть вещественными* [1]).

Данное вещественное число будем называть *положительным* (*отрицательным*), если оно представимо в виде положительной (отрицательной) бесконечной десятичной дроби.

В состав множества вещественных чисел входят, конечно, и все рациональные числа, ибо все они представимы в виде бесконечных десятичных дробей. Представление данного рационального числа в виде бесконечной десятичной дроби можно получить, например, из следующих соображений. Любому раци-

---

[1]) Как уже отмечалось в сноске [2]) на с. 20, понятие числа относится к *начальным понятиям.*

ональному числу соответствует определенная точка M числовой оси, а этой точке ставится в соответствие при помощи способа, указанного в пункте 2, определенная бесконечная десятичная дробь. Так, рациональному числу $\frac{1}{2}$ ставится в соответствие бесконечная десятичная дробь $0,4999\ldots$, рациональному числу $\frac{4}{3}$ бесконечная десятичная дробь $1,333\ldots$

Вещественные числа, не являющиеся рациональными, принято называть *иррациональными.*

Нашей задачей является последовательное перенесение на случай произвольных вещественных чисел трех правил и всех *основных свойств* рациональных чисел, перечисленных в п. 1. Тем самым для вещественных чисел будут обоснованы все правила элементарной алгебры, относящиеся к арифметическим действиям и к сочетанию равенств и неравенств.

В этом пункте мы установим правило сравнения вещественных чисел. Прежде чем перейти к формулировке этого правила, договоримся об определенной форме записи тех рациональных чисел, которые *представимы в виде конечной десятичной дроби.* Заметим, что указанные рациональные числа допускают *двоякую запись* в виде бесконечных десятичных дробей. Например, число $\frac{1}{2} = 0,5$ можно записать: 1) в виде $\frac{1}{2} = 0,4999\ \ldots$; 2) в виде $\frac{1}{2} = 0,5000\ \ldots$

И вообще рациональное число $a_0, a_1 a_2\ \ldots\ a_n$, где $a_n \neq 0$, можно записать: 1) в виде $a_0, a_1 a_2\ \ldots\ a_{n-1}(a_n - 1)\,999\ \ldots$; 2) в виде $a_0, a_1 a_2\ \ldots\ a_n\,000\ \ldots$

Первая из указанных двух записей может быть получена по способу, описанному в п. 2, а вторая — формальным превращением данной конечной десятичной дроби в бесконечную посредством дописывания нулей.

Мы договоримся *при сравнении вещественных чисел* пользоваться для указанных рациональных чисел лишь первой из этих двух форм записи в виде бесконечной десятичной дроби.

Иными словами, при сравнении вещественных чисел мы не будем употреблять бесконечные десятичные дроби, все десятичные знаки которых, начиная с некоторого места, равны нулю (за исключением, конечно, дроби $0,\ 000\ \ldots$) [1]).

Перейдем теперь к формулировке *правила сравнения* вещественных чисел.

---

[1]) Принятие такой договоренности вполне соответствует процессу измерения отрезка, описанному в п. 2, ибо описанный процесс не может привести к бесконечной десятичной дроби, у которой все десятичные знаки, начиная с некоторого места, равны нулю.

Рассмотрим два произвольных вещественных числа a и b. Пусть эти числа представимы следующими бесконечными десятичными дробями:

$$a = \pm a_0,\ a_1 a_2 \ldots a_n \ldots, \tag{2.3}$$

$$b = \pm b_0,\ b_1 b_2 \ldots b_n \ldots \tag{2.4}$$

(где из двух знаков $\pm$ берется какой-то один).

Два вещественных числа (2.3) и (2.4) называются *равными*, если они имеют одинаковые знаки и если справедливы равенства $a_0 = b_0,\ a_1 = b_1, \ldots, a_n = b_n, \ldots$

Пусть даны два *неравных* вещественных числа a и b. Установим правило, при помощи которого можно прийти к заключению, каким знаком, $>$ или $<$, связаны эти два числа.

1. Пусть сначала a и b *оба неотрицательны* и имеют следующие представления: $a = a_0,\ a_1 a_2 \ldots a_n \ldots$; $b = b_0,\ b_1 b_2 \ldots b_n \ldots$

Так как числа a и b не равны, то нарушается хотя бы одно из равенств $a_0 = b_0,\ a_1 = b_1,\ \ldots,\ a_n = b_n, \ldots$ Обозначим через k наименьший из номеров n, для которых нарушается равенство $a_n = b_n$ [1]. Тогда мы будем считать, что $a > b$, если $a_k > b_k$, и $a < b$, если $a_k < b_k$.

2. Если из двух чисел a и b *одно неотрицательно*, а *другое отрицательно*, то мы, естественно, будем считать, что неотрицательное число больше отрицательного.

3. Остается рассмотреть случай, когда *оба числа a и b отрицательны. Договоримся называть м о д у л е м вещественного числа a неотрицательное вещественное число, обозначаемое символом $|a|$ и равное десятичной дроби, представляющей число a, взятой со знаком $+$.*

Если a и b *оба отрицательны*, то мы будем считать, что $a > b$, если $|b| > |a|$, и $a < b$, если $|a| > |b|$ [2].

---

[1]) Итак мы считаем, что $a_0 = b_0,\ a_1 = b_1, \ldots, a_{k-1} = b_{k-1}$, но $a_k \neq b_k$.

[2]) Легко видеть, что сформулированное правило сравнения вещественных чисел в применении к двум рациональным числам приводит к тому же самому результату, что и правило сравнения рациональных чисел, указанное в сноске [1]). на с. 38.

В самом деле, достаточно рассмотреть лишь случай двух *неотрицательных* рациональных чисел a и b. Пусть $a > b$ согласно *правилу сравнения рациональных чисел*, и пусть $a = a_0,\ a_1 a_2 \ldots a_n \ldots$; $b = b_0,\ b_1 b_2 \ldots b_n \ldots$ Предположим, что рациональному числу a соответствует на числовой оси точка M_1, а рациональному числу b — точка M_2. Тогда ясно, что точка M_1 лежит правее точки M_2. Вместе с тем из п. 2 вытекает, что *целое число* $a_0 a_1 \ldots a_k (b_0 b_1 \ldots b_k)$ показывает, сколько раз $\frac{1}{10^k}$ часть масштабного отрезка OE укладывается в отрезке OM_1 (OM_2) с выкинутым правым концом. Поскольку отрезок OM_1 больше отрезка OM_2, то найдется такой номер k, что $a_0 a_1 \ldots a_{k-1} = b_0 b_1 \ldots b_{k-1}$, а $a_0 a_1 \ldots a_k > b_0 b_1 \ldots b_k$, но это и означает, что $a > b$ *согласно правилу сравнения вещественных чисел.*

Убедимся, что правило сравнения вещественных чисел обладает свойством 1°, сформулированным в п. 1 для рациональных чисел. Именно, докажем, что если a, b и c — произвольные вещественные числа и *если* $a > b$ *и* $b > c$, *то* $a > c$ (свойство транзитивности знака $>$) [1]). Для доказательства этого свойства рассмотрим три возможных случая.

1. Пусть сначала $c \geqslant 0$. Тогда из правила сравнения вещественных чисел очевидно, что $b > 0$ и $a > 0$. Пусть $a = a_0, a_1 a_2 \ldots a_n \ldots$; $b = b_0, b_1 b_2 \ldots b_n \ldots$; $c = c_0, c_1 c_2 \ldots \ldots c_n \ldots$ Обозначим через k наименьший из номеров n, для которых нарушается равенство $a_n = b_n$ (т. е. предположим, что $a_0 = b_0$, $a_1 = b_1$, $\ldots$, $a_{k-1} = b_{k-1}$, $a_k > b_k$), а через p наименьший из номеров n, для которых нарушается равенство $b_n = c_n$ (т. е. предположим, что $b_0 = c_0, b_1 = c_1, \ldots, b_{p-1} = c_{p-1}, b_p > c_p$). Тогда, если обозначить через m наименьший из двух номеров k и p, то будут справедливы соотношения $a_0 = c_0$, $a_1 = c_1$, $\ldots$, $\ldots$ $a_{m-1} = c_{m-1}$, $a_m > c_m$, а это и означает, что $a > c$.

2. Пусть $c < 0$, $a \geqslant 0$. Тогда равенство $a > c$ будет справедливо при любом b.

3. Остается рассмотреть случай, когда все три числа a, b и c *отрицательны*. Так как $a > b$ и $b > c$, то $|b| > |a|$ и $|c| > |b|$. Но тогда, в силу уже рассмотренного выше случая трех положительных чисел, $|c| > |a|$, а это и означает, что $a > c$. Свойство транзитивности знака $>$ полностью доказано.

4. Приближение вещественного числа рациональными числами. В этом пункте мы покажем, что всякое вещественное число можно приблизить с любой степенью точности рациональными числами. Рассмотрим произвольное вещественное число a. Ради определенности будем считать это число неотрицательным и представим его в виде бесконечной десятичной дроби $a = a_0, a_1 a_2 \ldots a_n \ldots$

Обрывая указанную дробь на n-м знаке после запятой, получим рациональное число $a_0, a_1 a_2 \ldots a_n$. Увеличив это число на $\frac{1}{10^n}$, получим другое рациональное число $a_0, a_1 a_2 \ldots a_n + \frac{1}{10^n}$. Из правила сравнения вещественных чисел легко установить, что для любого номера n справедливы неравенства

$$a_0, a_1 a_2 \ldots a_n \leqslant a \leqslant a_0, a_1 a_2 \ldots a_n + \frac{1}{10^n}. \qquad (2.5)$$

Неравенства (2.5) означают, что *вещественное число a заключено между двумя рациональными числами, разность между которыми равна $\frac{1}{10^n}$. При этом номер n можно взять любой.*

---

[1]) Свойство транзитивности знака $=$, утверждающее, что из $a = b$ и $b = c$ следует, что $a = c$, сразу вытекает из правила сравнения вещественных чисел.

Покажем, что для любого *наперед взятого* положительного рационального числа ε, начиная с некоторого номера n, справедливо неравенство $\frac{1}{10^n} < \varepsilon$. В самом деле, каково бы ни было рациональное число $\varepsilon > 0$, найдется лишь конечное число натуральных чисел, не превосходящих числа $\frac{1}{\varepsilon}$. Поэтому лишь для конечного числа номеров n справедливо неравенство $10^n \leqslant \frac{1}{\varepsilon}$ или $\frac{1}{10^n} \geqslant \varepsilon$. Для всех же остальных номеров n справедливо обратное неравенство $\frac{1}{10^n} < \varepsilon$, что и требовалось доказать.

Таким образом, мы приходим к следующему *утверждению*: *для любого вещественного числа a и для любого наперед взятого положительного рационального числа ε найдутся два рациональных числа α_1 и α_2 такие, что $\alpha_1 \leqslant a \leqslant \alpha_2$, причем $\alpha_2 - \alpha_1 < \varepsilon$.*

Неравенства (2.5) позволяют утверждать, что рациональное число $a_0, a_1a_2a_3 \ldots a_n$ приближает вещественное число a с точностью до $\frac{1}{10^n}$. На практике всегда имеют дело с приближенным значением вещественного числа, заменяя его рациональным числом с требуемой степенью точности.

5. Множества вещественных чисел, ограниченные сверху или снизу. В этом пункте мы рассмотрим произвольное множество вещественных чисел, содержащее хотя бы одно число[1]). Это множество мы будем обозначать символом $\{x\}$. Отдельные числа, входящие в состав множества $\{x\}$, будем называть *элементами* этого множества[2]).

Определение 1. *Множество вещественных чисел $\{x\}$ называется ограниченным сверху (снизу), если существует такое вещественное число M (число m), что каждый элемент x множества $\{x\}$ удовлетворяет неравенству*

$$x \leqslant M \qquad (x \geqslant m).$$

При этом число M (число m) называется *верхней* (*нижней*) *гранью* множества $\{x\}$.

Конечно, любое ограниченное сверху множество $\{x\}$ имеет бесконечно много верхних граней. В самом деле, если вещественное число M — верхняя грань множества $\{x\}$, то любое вещественное число M^*, большее числа M, также является верхней гранью множества $\{x\}$. Аналогичное замечание можно сделать в отношении нижних граней ограниченного снизу множества $\{x\}$.

---

[1]) Такое множество обычно называют *непустым.*

[2]) Отметим, что понятие множества и его элемента относится к начальным понятиям (см. сноску [2]) на с. 20).

Так, например, множество всех отрицательных вещественных чисел ограничено сверху. В качестве верхней грани M такого множества можно взять любое неотрицательное вещественное число. Множество всех целых положительных чисел $1, 2, 3, \ldots$ ограничено снизу. В качестве нижней грани этого множества можно взять любое вещественное число m, удовлетворяющее неравенству $m \leqslant 1$.

Естественно, возникает вопрос о существовании *наименьшей* из верхних граней ограниченного сверху множества и *наибольшей* из нижних граней ограниченного снизу множества.

Определение 2. *Наименьшая из всех верхних граней ограниченного сверху множества $\{x\}$ называется точной верхней гранью этого множества и обозначается символом $\overline{x} = \sup\{x\}$* [1].

Наибольшая из всех нижних граней ограниченного снизу множества $\{x\}$ называется точной нижней гранью этого множества и обозначается символом $\underline{x} = \inf\{x\}$ [2].

Определение 2 можно сформулировать и по другому, а именно:

Число $\overline{x}$ (число $\underline{x}$) называется точной верхней (точной нижней) гранью ограниченного сверху (снизу) множества $\{x\}$, если выполнены следующие два требования: 1) каждый элемент x множества $\{x\}$ удовлетворяет неравенству $x \leqslant \overline{x}$ ($x \geqslant \underline{x}$), 2) каково бы ни было вещественное число x', меньшее $\overline{x}$ (большее $\underline{x}$), найдется хотя бы один элемент x множества $\{x\}$, удовлетворяющий неравенству $x > x'$ ($x < x'$).

В этом определении требование 1) означает, что число $\overline{x}$ (число $\underline{x}$) является *одной* из верхних (нижних) граней, а требование 2) говорит о том, что эта грань является *наименьшей* (*наибольшей*) и уменьшена (увеличена) быть не может.

Очевидно, что у множества всех отрицательных вещественных чисел существует точная верхняя грань — число нуль, причем это число *не принадлежит указанному множеству*. Очевидно также, что у множества всех целых положительных чисел 1, 2, 3, ... существует точная нижняя грань $\underline{x} = 1$, которая *принадлежит указанному множеству* (т. е. является *наименьшим элементом* этого множества). Таким образом, точная верхняя (точная нижняя) грань множества может как принадлежать, так и не принадлежать этому множеству.

---

[1]) sup — первые три буквы латинского слова supremum («супремум»), которое переводится как «наивысшее».

[2]) inf — первые три буквы латинского слова infimum («инфимум»), которое переводится как «наинизшее».

Существование у любого ограниченного сверху (снизу) множества точной верхней (точной нижней) грани не является очевидным и требует доказательства.

Докажем следующую *основную* теорему.

Теорема 2.1. *Если множество вещественных чисел содержит хотя бы один элемент и ограничено сверху* (*снизу*), *то существует вещественное число* $\overline{x}$ (*число* $\underline{x}$), *которое является точной верхней* (*точной нижней*) *гранью этого множества.*

Доказательство. Мы остановимся лишь на доказательстве существования точной верхней грани у любого ограниченного сверху множества, ибо существование точной нижней грани у любого ограниченного снизу множества доказывается совершенно аналогично.

Итак, пусть множество $\{x\}$ ограничено сверху, т. е. существует такое вещественное число M, что каждый элемент x множества $\{x\}$ удовлетворяет неравенству

$$x \leqslant M. \tag{2.6}$$

Могут представиться два случая: 1°. Среди элементов множества $\{x\}$ есть *хотя бы одно* неотрицательное вещественное число. 2°. Все элементы множества являются отрицательными вещественными числами. Эти случаи мы рассмотрим отдельно.

1°. Рассмотрим лишь неотрицательные вещественные числа, входящие в состав множества $\{x\}$. Каждое из этих чисел представим в виде бесконечной десятичной дроби и рассмотрим целые части этих десятичных дробей. В силу (2.6) все целые части не превосходят числа M, а поэтому найдется *наибольшая* из целых частей, которую мы обозначим через $\overline{x}_0$. Сохраним среди неотрицательных чисел множества $\{x\}$ те, у которых целая часть равна $\overline{x}_0$, и отбросим все остальные числа. У сохраненных чисел рассмотрим первые десятичные знаки после запятой. Наибольший из этих знаков обозначим через $\overline{x}_1$. Сохраним среди неотрицательных чисел множества $\{x\}$ те, у которых целая часть равна $\overline{x}_0$, а первый десятичный знак равен $\overline{x}_1$, и отбросим все остальные числа. У сохраненных чисел рассмотрим вторые десятичные знаки после запятой. Наибольший из этих знаков обозначим через $\overline{x}_2$. Продолжая аналогичные рассуждения далее, мы последовательно определим десятичные знаки некоторого вещественного числа $\overline{x}$:

$$\overline{x} = \overline{x}_0,\ \overline{x}_1\overline{x}_2\ \ldots\ \overline{x}_n\ \ldots$$

Докажем, что это вещественное число $\overline{x}$ и является точной верхней гранью множества $\{x\}$. Для этого достаточно доказать *два утверждения*: 1) что каждый элемент x множества $\{x\}$ удовлетворяет неравенству $x \leqslant \overline{x}$; 2) что, каково бы ни было вещественное число x', меньшее $\overline{x}$, найдется хотя бы один элемент x множества $\{x\}$, удовлетворяющий неравенству $x > x'$.

Сначала докажем *утверждение* 1). Так как $\overline{x}$ неотрицательно, то любое *отрицательное* число x из множества $\{x\}$ заведомо удовлетворяет неравенству $x \leqslant \overline{x}$. Пусть $x = x_0, x_1 \ldots x_n \ldots$ — любое *неотрицательное* число, входящее в состав множества $\{x\}$.

Предположим, что это число x не удовлетворяет неравенству $x \leqslant \overline{x}$. Тогда $x > \overline{x}$ и по правилу сравнения найдется номер k такой, что $x_0 = \overline{x}_0, \ldots, x_{k-1} = \overline{x}_{k-1}, x_k > \overline{x}_k$. Но последние соотношения противоречат тому, что в качестве $\overline{x}_k$ берется наибольший из десятичных знаков x_k тех элементов x, у которых целая часть и первые $(k-1)$ знаков после запятой соответственно равны $\overline{x}_0, \overline{x}_1, \ldots, \overline{x}_{k-1}$.

Докажем теперь *утверждение* 2). Пусть $x' = x'_0, x'_1 x'_2 \ldots$ $\ldots x'_n \ldots$ — произвольное вещественное число [1], меньшее $\overline{x}$. Тогда в силу правила сравнения вещественных чисел найдется номер n такой, что

$$x'_0 = \overline{x}_0, \quad x'_1 = \overline{x}_1, \ \ldots, x'_{n-1} = \overline{x}_{n-1}, \quad x'_n < \overline{x}_n. \tag{2.7}$$

С другой стороны, число x мы строили так, что среди элементов множества $\{x\}$ найдется число $x = x_0, x_1 x_2 \ldots x_n \ldots$, целая часть и первые n десятичных знаков у которого те же, что и у числа $\overline{x}$, т. е.

$$\overline{x}_0 = x_0, \quad \overline{x}_1 = x_1, \ \ldots, \overline{x}_{n-1} = x_{n-1}, \quad \overline{x}_n = x_n. \tag{2.8}$$

Сопоставляя (2.7) и (2.8), в силу правила сравнения вещественных чисел получим, что $x' < x$. *Утверждение* 2) *доказано.* Таким образом, для случая 1° существование точной верхней грани доказано.

2°. Аналогично доказывается существование точной верхней грани и во втором случае, когда *все элементы множества* $\{x\}$ *являются отрицательными вещественными числами.* В этом случае все элементы множества $\{x\}$ мы представим в виде отрицательных бесконечных десятичных дробей. Обозначим через $\overline{x}_0$ *наименьшую* из целых частей этих дробей; через $\overline{x}_1$ — *наименьший* из первых десятичных знаков тех из этих дробей, у которых целая часть равна $\overline{x}_0$; через $\overline{x}_2$ — *наименьший* из вторых десятичных знаков тех из этих дробей, у которых целая часть равна $\overline{x}_0$, а первый десятичный знак равен $\overline{x}_1$; ... Таким путем мы определим отрицательное вещественное число

$$\overline{x} = -\overline{x}_0, \ \overline{x}_1 \overline{x}_2 \ \ldots \ \overline{x}_n \ \ldots$$

В полной аналогии со случаем 1° доказывается, что число $\overline{x}$ является точной верхней гранью множества $\{x\}$ (т. е. удовлетворя-

[1] Это число x' мы, не ограничивая общности, будем считать неотрицательным, ибо если бы оно было отрицательным, то неравенству $x > x'$ удовлетворял бы неотрицательный элемент x множества $\{x\}$.

ет двум утверждениям, сформулированным при рассмотрении случая 1°). Теорема доказана.

З а м е ч а н и е . При доказательстве теоремы 2.1 для случая 2° у числа $\overline{x} = -\overline{x}_0, \overline{x}_1\overline{x}_2 \ldots \overline{x}_n \ldots$ все десятичные знаки, начиная с некоторого места, могут оказаться равными нулю, т. е. это число может оказаться имеющим вид

$$\overline{x} = -\overline{x}_0, \overline{x}_1 \ldots \overline{x}_{k-1}\overline{x}_k\, 000 \ldots,$$

где $\overline{x}_k \neq 0$.

В этом случае остается в силе приведенное выше доказательство, но согласно договоренности, принятой в п. 3, при сравнении с элементами множества число $\overline{x}$ следует записывать в виде

$$\overline{x} = -\overline{x}_0,\ \overline{x}_1 \ldots \overline{x}_{k-1}(\overline{x}_k - 1)\ 999 \ldots$$

§ 2. Арифметические операции над вещественными числами. Основные свойства вещественных чисел

1. Определение суммы вещественных чисел. Одним из важнейших вопросов теории вещественных чисел является *вопрос об определении операций сложения и умножения этих чисел и о свойствах этих операций.* Остановимся прежде всего на операции сложения вещественных чисел.

Хорошо известно, как складывают два вещественных числа на практике. Для того чтобы сложить два вещественных числа a и b, их заменяют с требуемой степенью точности рациональными числами и за приближенное значение суммы двух данных вещественных чисел берут сумму указанных рациональных чисел. При этом совершенно не заботятся о том, с какой стороны (по недостатку или по избытку) взятые рациональные числа приближают данные вещественные числа a и b. Фактически указанный практический способ сложения вещественных чисел предполагает, что чем точнее рациональные числа α и β приближают (с любой стороны) вещественные числа a и b соответственно, тем точнее сумма $\alpha + \beta$ приближает то вещественное число, которое должно являться суммой вещественных чисел a и b.

Желание оправдать указанный практический способ сложения вещественных чисел, естественно, приводит нас к следующему определению суммы двух вещественных чисел.

Пусть α_1 и α_2 — какие угодно рациональные числа, между которыми заключено вещественное число a (т. е. $\alpha_1 \leqslant a \leqslant \alpha_2$), а β_1 и β_2 — какие угодно рациональные числа, между которыми заключено вещественное число b (т. е. $\beta_1 \leqslant b \leqslant \beta_2$). Тогда суммой вещественных чисел a и b мы назовем такое веществен-

ное число x, которое заключено между всеми рациональными числами $\alpha_1 + \beta_1$ и $\alpha_2 + \beta_2$ [1]).

Иными словами, *суммой вещественных чисел a и b мы назовем такое вещественное число x, которое для любых рациональных чисел α_1, α_2, β_1 и β_2, удовлетворяющих неравенствам*

$$\alpha_1 \leqslant a \leqslant \alpha_2, \quad \beta_1 \leqslant b \leqslant \beta_2, \tag{2.9}$$

удовлетворяет следующим неравенствам:

$$\alpha_1 + \beta_1 \leqslant x \leqslant \alpha_2 + \beta_2. \tag{2.10}$$

Существование такого вещественного числа x, и притом только одного, не вызывает сомнений. (Соответствующее доказательство приводится ниже.) Нетрудно убедиться в том, что таким числом x является точная верхняя грань множества $\{\alpha_1 + \beta_1\}$ сумм всех рациональных чисел α_1 и β_1, удовлетворяющих левым неравенствам (2.9) [2]).

1°. Прежде всего убедимся в том, что указанная верхняя грань существует. В самом деле, фиксируем произвольные рациональные числа α_2 и β_2, удовлетворяющие правым неравенствам (2.9), и рассмотрим всевозможные рациональные числа α_1 и β_1, удовлетворяющие левым неравенствам (2.9). Из свойства транзитивности знака $>$, установленного в п. 3 § 1, приходим к выводу, что $\alpha_1 < \alpha_2$, $\beta_1 < \beta_2$, а из этих неравенств следует, что $\alpha_1 + \beta_1 \leqslant \alpha_2 + \beta_2$ (см. конец п. 1 § 1). Таким образом, множество всех рациональных чисел $\{\alpha_1 + \beta_1\}$ *ограничено сверху* и число $\alpha_2 + \beta_2$ является *одной из верхних граней* этого множества. По теореме 2.1 у множества $\{\alpha_1 + \beta_1\}$ существует точная верхняя грань, которую мы обозначим через x. Остается убедиться в том, что число x является суммой вещественных чисел a и b, т. е. удовлетворяет неравенствам (2.10). В самом деле, по определению точной верхней грани, справедливо левое неравенство (2.10), а справедливость правого неравенства (2.10) вытекает из того, что $\alpha_2 + \beta_2$ — *одна из верхних граней*, а x — *точная верхняя грань* множества $\{\alpha_1 + \beta_1\}$.

2°. Установим теперь, что существует *только одно* вещественное число x, удовлетворяющее неравенствам (2.10). Будем опираться на следующую лемму (для удобства доказательство этой леммы отнесено в конец настоящего пункта):

Лемма. *Если для двух данных вещественных чисел x_1 и x_2 и для любого наперед взятого положительного рационального ε найдутся два рациональных числа γ_1 и γ_2 таких, что $\gamma_1 \leqslant x_1 \leqslant \gamma_2$, $\gamma_1 \leqslant x_2 \leqslant \gamma_2$ и $\gamma_2 - \gamma_1 < \varepsilon$, то числа x_1 и x_2 равны.*

Предположим, что существуют два вещественных числа x_1 и x_2, удовлетворяющих неравенствам (2.10) (при любых рациональных числах α_1, α_2, β_1 и β_2, удовлетворяющих неравенствам (2.9)). Возьмем любое положительное рациональное число ε. Согласно утверждению, доказанному в п. 4 § 1,

---

[1]) Заметим, что в элементарном курсе сумма двух вещественных чисел определялась аналогичным образом (см. А. П. Киселев. Алгебра II. Учпедгиз, 1959, с. 9).

[2]) Аналогично можно было бы убедиться в том, что таким числом является точная нижняя грань множества $\{\alpha_2 + \beta_2\}$ сумм всех рациональных чисел α_2 и β_2, удовлетворяющих правым неравенствам (2.9).

для вещественного числа a и для рационального числа $\varepsilon/2$ найдутся такие рациональные числа α_1 и α_2, что $\alpha_1 \leqslant a \leqslant \alpha_2$, причем $\alpha_2 - \alpha_1 < \varepsilon/2$. Аналогично для вещественного числа b и для рационального числа $\varepsilon/2$ найдутся такие рациональные числа β_1 и β_2, что $\beta_1 \leqslant b \leqslant \beta_2$, причем $\beta_2 - \beta_1 < \varepsilon/2$.

Таким образом, оба вещественных числа x_1 и x_2 будут заключены между двумя рациональными числами $(\alpha_1 + \beta_1)$ и $(\alpha_2 + \beta_2)$, разность между которыми (по модулю) равна

$$(\alpha_2 + \beta_2) - (\alpha_1 + \beta_1) = (\alpha_2 - \alpha_1) + (\beta_2 - \beta_1) < \varepsilon.$$

Так как ε — любое наперед взятое положительное рациональное число, то $x_1 = x_2$ в силу сформулированной выше леммы.

3°. Установим, наконец, что в применении к двум *рациональным* числам сформулированное нами определение суммы вещественных чисел и известное из элементарного курса определение суммы рациональных чисел *приводят к одному и тому же результату*. В самом деле, если a и b — два рациональных числа, удовлетворяющих неравенствам $\alpha_1 \leqslant a \leqslant \alpha_2$, $\beta_1 \leqslant b \leqslant \beta_2$, а $(a+b)$ — их сумма, полученная по известному из элементарного курса определению, то очевидно, что

$$(\alpha_1 + \beta_1) \leqslant a + b \leqslant (\alpha_2 + \beta_2), \tag{2.11}$$

причем, согласно только что доказанному утверждению, рациональное число $(a+b)$ является единственным вещественным числом, удовлетворяющим неравенствам (2.11).

4°. Прежде чем доказывать сформулированную выше лемму, установим следующее вспомогательное утверждение.

Каковы бы ни были два вещественных числа a и b такие, что $b < a$, найдется рациональное число α, заключенное между ними, т. е. такое, что $b < \alpha < a$ (а следовательно, найдется и бесконечное множество различных рациональных чисел, заключенных между a и b).

Очевидно, достаточно рассмотреть случай, когда оба числа a и b *неотрицательны*, ибо случай, когда a и b оба *неположительны*, сводится к указанному случаю посредством перехода к модулям, а случай, когда *одно число положительно*, а *другое отрицательно*, тривиален (в качестве α можно взять нуль).

Итак, пусть $b \geqslant 0$; $b < a$; $a = a_0,\ a_1\, a_2\, \ldots\, a_n\, \ldots$; $b = b_0,\ b_1\, b_2\, \ldots\, b_n\, \ldots$ Пусть k — наименьший из номеров n, для которых нарушается равенство $a_n = b_n$, т. е. $a_0 = b_0$, $a_1 = b_1\, \ldots\, a_{k-1} = b_{k-1}$, $a_k > b_k$.

В силу договоренности, принятой в п. 3 § 1, можно считать, что *все a_n при $n > k$ не могут быть равны нулю.* Пусть p — *наименьший* из номеров n, превосходящих k, для которых $a_n > 0$, т. е.

$$a = a_0,\ a_1,\ \ldots\ a_k\ 00\ \ldots\ 0\ a_p\ \ldots$$

Тогда из правила сравнения вещественных чисел непосредственно вытекает, что рациональное число $\alpha = a_0, a_1\, \ldots\, a_k\ 00\, \ldots\, 0\ (a_p - 1)\ 999\ldots$ удовлетворяет неравенствам $b < \alpha < a$. Вспомогательное утверждение доказано.

Обращаясь к доказательству леммы, предположим, что $x_1 \neq x_2$. Пусть ради определенности $x_1 < x_2$. Тогда в силу вспомогательного утверждения найдутся два рациональных числа α_1 и α_2 таких, что

$$x_1 < \alpha_1 < \alpha_2 < x_2. \tag{2.12}$$

Пусть теперь γ_1 и γ_2 — какие угодно рациональные числа, удовлетворяющие неравенствам

$$\gamma_1 \leqslant x_1 \leqslant \gamma_2, \qquad \gamma_1 \leqslant x_2 \leqslant \gamma_2. \tag{2.13}$$

Из сопоставления (2.12) и (2.13) и из свойства транзитивности знака $>$ получим $\gamma_1 < \alpha_1 < \alpha_2 < \gamma_2$. Но тогда $\gamma_2 - \gamma_1 > \alpha_2 - \alpha_1$, что противоречит тому, что разность $\gamma_2 - \gamma_1$ может быть сделана меньше любого наперед взятого положительного рационального числа ε. Лемма доказана.

2. Определение произведения вещественных чисел. Поскольку вопросы, возникающие в связи с определением произведения вещественных чисел, в основном совпадают с вопросами, рассмотренными при определении суммы вещественных чисел, мы ограничимся лишь краткой формулировкой результатов.

Определим сначала произведение двух *положительных* чисел a и b. Обозначим через α_1, α_2, β_1 и β_2 любые положительные рациональные числа, удовлетворяющие неравенствам $\alpha_1 \leqslant a \leqslant \alpha_2$, $\beta_1 \leqslant b \leqslant \beta_2$.

Произведением *положительных* вещественных чисел a и b назовем вещественное число x, удовлетворяющее неравенствам $\alpha_1\beta_1 \leqslant x \leqslant \alpha_2\beta_2$.

Точно так же, как и для суммы, устанавливается, что такое вещественное число x существует, и притом только одно. Легко убедиться в том, что таким числом x является точная верхняя грань множества $\{\alpha_1\beta_1\}$ произведений всех рациональных чисел α_1 и β_1, удовлетворяющих неравенствам $0 < \alpha_1 \leqslant a$, $0 < \beta_1 \leqslant b$.

Произведение вещественных чисел *любого знака* определяется по следующему правилу:

1) считают, что $a \cdot 0 = 0 \cdot a = 0$;

2) считают, что $ab = \begin{cases} |a| \cdot |b|, & \text{если } a \text{ и } b \text{ одного знака,} \\ -|a| \cdot |b|, & \text{если } a \text{ и } b \text{ разных знаков.} \end{cases}$

В заключение отметим, что точно так же, как и для суммы, можно доказать, что в применении к двум рациональным числам определение произведения вещественных чисел и известное из элементарного курса определение произведения рациональных чисел приводят к одному и тому же результату.

3. Свойства вещественных чисел. В этом пункте мы убедимся в справедливости для произвольных вещественных чисел *всех основных свойств*, перечисленных в п. 1 § 1 для рациональных чисел. Справедливость для вещественных чисел свойства 1° уже установлена выше. Таким образом, нужно выяснить лишь вопрос о справедливости для вещественных чисел свойств 2°–13°.

Легко убедиться в справедливости для вещественных чисел свойств 2°–5° и 11°, связанных с понятием суммы. Справедливость свойств 2°–5° непосредственно вытекает из определения суммы вещественных чисел и из справедливости указанных свойств для рациональных чисел.

Остановимся на доказательстве свойства 11°, т. е. докажем, что если a, b и c — *любые три вещественных числа и* $a > b$, *то* $a + c > b + c$.

Так как $a > b$, то в силу вспомогательного утверждения, установленного при доказательстве леммы (см. конец п. 1 настоящего параграфа), найдутся рациональные числа α_1 и β_2 такие, что $a > \alpha_1 > \beta_2 > b$. Для вещественного числа c и для положительного рационального числа $\varepsilon = \alpha_1 - \beta_2$ найдутся рациональные числа γ_1 и γ_2 такие, что $\gamma_1 \leqslant c \leqslant \gamma_2$, причем $\gamma_2 - \gamma_1 < \varepsilon = \alpha_1 - \beta_2$ (см. утверждение, доказанное в п. 4 § 1).

Пусть далее α_2 и β_1 — любые рациональные числа, удовлетворяющие неравенствам $\alpha_2 \geqslant a$, $b \geqslant \beta_1$. Тогда по определению суммы вещественных чисел

$$\alpha_2 + \gamma_2 \geqslant a + c \geqslant \alpha_1 + \gamma_1, \quad \beta_2 + \gamma_2 \geqslant b + c \geqslant \beta_1 + \gamma_1.$$

Для доказательства того, что $a + c > b + c$, в силу транзитивности знака $>$ достаточно доказать, что $\alpha_1 + \gamma_1 > \beta_2 + \gamma_2$, но это непосредственно вытекает из неравенства $\gamma_2 - \gamma_1 < \alpha_1 - \beta_2$.

Заметим, что вопрос *о вычитании* вещественных чисел как о действии, обратном сложению, полностью исчерпывается на основании свойств 2°–5°. *Назовем* р а з н о с т ь ю *вещественных чисел* a *и* b *вещественное число* c *такое, что* $c + b = a$.

Убедимся в том, что такой разностью является число $c = a + b'$, где b' — число, противоположное b.

В самом деле, используя свойства 2°–5°, можем записать

$$c + b = (a + b') + b = a + (b' + b) = a + 0 = a.$$

Убедимся в том, что существует *только одно* вещественное число, являющееся разностью двух данных вещественных чисел. Предположим, что кроме указанного выше числа $c = a + b'$ существует еще одно число d такое, что $d + b = a$. Тогда, с одной стороны, $(d+b)+b' = a+b' = c$, с другой стороны, $(d+b)+b' = d + (b + b') = d + 0 = d$, т. е. $c = d$.

Из определения разности и из свойства 5° вытекает, что число a', противоположное a, равно разности числа 0 и числа a. Это число обычно записывают в виде $-a$.

Не вызывает затруднения перенесение на случай вещественных чисел свойств 6°, 7°, 8°, 9°, 10° и 12°, связанных с понятием произведения. Отметим лишь в отношении свойства 9°, что если a — положительное вещественное число, а α_1 и α_2 — какие угодно рациональные числа, удовлетворяющие неравенствам $0 < \alpha_1 \leqslant a \leqslant \alpha_2$, то число a', обратное числу a, определяется как единственное вещественное число, удовлетворяющее неравенствам $\dfrac{1}{\alpha_2} \leqslant a' \leqslant \dfrac{1}{\alpha_1}$ [1]).

Свойства 6°–9° позволяют сделать вывод, что для любых двух вещественных чисел a и b $(b \neq 0)$ существует, и притом

[1]) В качестве числа a' может быть взята точная верхняя грань множества всех рациональных чисел $\left\{\dfrac{1}{\alpha_2}\right\}$.

только одно, вещественное число c, удовлетворяющее условию $cb = a$. Это число c называется *частным* чисел a и b.

Из определения частного и из свойства 9° вытекает, что число a', обратное числу a, равно частному чисел 1 и a, которое мы обозначим как $1/a$.

Заметим, наконец, что на случай вещественных чисел переносится и последнее 13-е свойство рациональных чисел, а именно: *каково бы ни было вещественное число a, можно число 1 повторить слагаемым столько раз, что полученная сумма превзойдет a* [1]). Докажем это свойство. В случае $a < 0$ доказательство не требуется, ибо $1 > a$. Пусть $a \geqslant 0$; $a = a_0,\ a_1\ \ldots\ a_n\ \ldots$ В силу того, что определение суммы вещественных чисел в применении к сумме рациональных чисел совпадает с определением суммы рациональных чисел, повторив число 1 слагаемым n раз, получим целое число n. Таким образом, достаточно доказать, что для числа a найдется целое число n такое, что $n > a$. Но это очевидно: достаточно взять $n = a_0 + 2$.

Таким образом, *на случай вещественных чисел переносятся все основные свойства, сформулированные для рациональных чисел в п. 1 настоящего параграфа. Следовательно, для вещественных чисел сохраняют свою силу все правила алгебры, относящиеся к арифметическим действиям и к сочетанию равенств и неравенств.*

На этом мы заканчиваем изложение элементов теории вещественных чисел, необходимых для построения курса математического анализа. Дальнейшее развитие теории вещественных чисел читатель может найти в приложении в конце книги.

В заключение заметим, что мы построили теорию вещественных чисел, апеллируя к их представлению в виде бесконечных десятичных дробей.

Совершенно ясно, что мы могли бы апеллировать и к бесконечным дробям с любым другим (не обязательно десятичным) основанием. В этом отношении системы счисления с различными основаниями эквивалентны между собой. Однако в некоторых вопросах приближенных вычислений и, в частности, при округлении чисел до заданного количества разрядов системы счисления с четными и нечетными основаниями ведут себя существенно по-разному (см. по этому поводу дополнение 2 к этой главе).

4. Некоторые часто употребляемые соотношения. Докажем справедливость для любых вещественных чисел a и b следующих двух соотношений:

$$|\,ab\,| = |\,a\,| \cdot |\,b\,|, \tag{2.14}$$

$$|\,a + b\,| \leqslant |\,a\,| + |\,b\,|. \tag{2.15}$$

[1]) Заметим, что это свойство называют *аксиомой Архимеда*.

Словесная формулировка этих соотношений такова: 1) *модуль произведения двух чисел равен произведению модулей этих чисел,* 2) *модуль суммы двух чисел не превосходит суммы модулей этих чисел.*

Соотношение (2.14) непосредственно вытекает из определения произведения двух вещественных чисел. Докажем соотношение (2.15). На основании определения модуля и правила сравнения для любых вещественных чисел a и b справедливы неравенства

$$-|a| \leqslant a \leqslant |a|, \qquad -|b| \leqslant b \leqslant |b|.$$

В силу основных свойств. можно почленно складывать неравенства одного знака (это доказано в конце п. 1 § 1). Поэтому

$$-(|a| + |b|) \leqslant a + b \leqslant |a| + |b|.$$

Используя в случае $a + b > 0$ правое, а в случае $a + b \leqslant 0$ левое из последних неравенств, мы получим неравенство (2.15).

Замечание. Отметим еще два часто употребляемых неравенства:

$$|a - b| \geqslant |a| - |b|, \tag{2.16}$$

$$|a - b| \geqslant |a| - |b|. \tag{2.17}$$

Для получения неравенства (2.16) достаточно учесть, что $a = (a-b)+b$, и, опираясь на (2.15), записать неравенство: $|a| \leqslant |a-b|+|b|$. Неравенство (2.17) является следствием неравенства (2.16) и неравенства $|b-a| \geqslant |b| - |a|$, которое получается из (2.16), если поменять местами числа a и b.

§ 3. Некоторые конкретные множества вещественных чисел

В дальнейшем нам часто придется иметь дело с различными множествами вещественных чисел. Будем обозначать произвольное множество вещественных чисел символом $\{x\}$, а числа, входящие в состав этого множества, будем называть *элементами* или *точками* этого множества. Мы будем говорить, что *точка x_1 множества $\{x\}$ отлична от точки x_2 этого множества, если вещественные числа x_1 и x_2 не равны друг другу.* Если при этом справедливо неравенство $x_1 > x_2$ $(x_1 < x_2)$, то будем говорить, что *точка x_1 лежит правее (левее) точки x_2.*

Рассмотрим некоторые наиболее употребительные множества вещественных чисел.

1°. Множество вещественных чисел x, удовлетворяющих неравенствам $a \leqslant x \leqslant b$, где $a < b$, будем называть *сегментом* и обозначать символом $[a, b]$. При этом числа a и b будем называть *граничными точками* или *концами* сегмента $[a, b]$, а любое число x, удовлетворяющее неравенствам $a < x < b$, будем называть *внутренней точкой* сегмента $[a, b]$.

2°. Множество всех вещественных чисел x, удовлетворяющих неравенствам $a \leqslant x < b$ $\{$или $a < x \leqslant b\}$, будем называть *полусегментом* и обозначать символом $[a, b)$ $\{$или $(a, b]\}$.

3°. Множество всех вещественных чисел x, удовлетворяющих неравенствам $a < x < b$, будем называть *интервалом* и обозначать символом (a, b).

4°. Любой интервал, содержащий точку c, будем называть *окрестностью точки* c.

5°. Интервал $(c-\varepsilon, c+\varepsilon)$, где $\varepsilon > 0$, будем называть *ε-окрестностью точки* c.

6°. Множество всех вещественных чисел будем называть *числовой* (*бесконечной*) *прямой* и обозначать символом $(-\infty, +\infty)$.

7°. Множество всех вещественных чисел x, удовлетворяющих неравенству $x \geqslant a$ $\{$или $x \leqslant b\}$, будем называть *полупрямой* и обозначать символом $[a, \infty)$ $\{$или $(-\infty, b]\}$.

8°. Множество всех вещественных чисел x, удовлетворяющих неравенству $x > a$ $\{$или $x < b\}$, будем называть *открытой полупрямой* и обозначать символом (a, ∞) $\{$или $(-\infty, b)\}$.

З а м е ч а н и е . Отметим, что сегмент иногда называют *замкнутым отрезком* или просто *отрезком*, а интервал — *открытым отрезком*.

Произвольное множество $\{x\}$ будем называть *плотным в себе*, если в любой окрестности каждой точки x этого множества содержится хотя бы одна точка множества, отличная от x. Примером плотного в себе множества может служить любое из определенных выше множеств 1°–8°. Другим примером плотного в себе множества может служить множество всех рациональных чисел, входящих в состав любого из множеств 1°–8°.

ДОПОЛНЕНИЕ 1

О ПЕРЕВОДЕ ЧИСЕЛ ИЗ ДЕСЯТИЧНОЙ СИСТЕМЫ СЧИСЛЕНИЯ В ДВОИЧНУЮ И ИЗ ДВОИЧНОЙ СИСТЕМЫ В ДЕСЯТИЧНУЮ

В этом дополнении мы остановимся на алгоритмах перевода чисел из десятичной системы счисления в двоичную и обратного перевода из двоичной системы в десятичную [1]).

Перевод чисел из десятичной системы счисления в двоичную. Для задания десятичного числа x_{10} в разрядной сетке электронной машины используют так называемую н о р м а л и з о в а н н у ю форму записи этого числа

$$x_{10} = q_{10} \cdot 10^{p_{10}}. \tag{2.18}$$

В этой форме записи величина

$$q_{10} = (1 - 2S_q)(\alpha_1 \cdot 10^{-1} + \alpha_2 \cdot 10^{-2} + \cdots + \alpha_9 \cdot 10^{-9}) \tag{2.19}$$

[1]) Излагаемые ниже алгоритмы реализуются, в частности, на электронной машине БЭСМ-4.

называется десятичной мантиссой данного числа, причем $\alpha_1 \geqslant 1$, S_q берется равным нулю при $q_{10} \geqslant 0$ и равным единице при $q_{10} < 0$ [1]), а показатель степени

$$p_{10} = (1 - 2S_p)(\beta_1 + 10\beta_2) \tag{2.20}$$

называется десятичным порядком данного числа, причем S_p берется равным нулю при $p_{10} \geqslant 0$ и равным единице при $p_{10} < 0$ [2]).

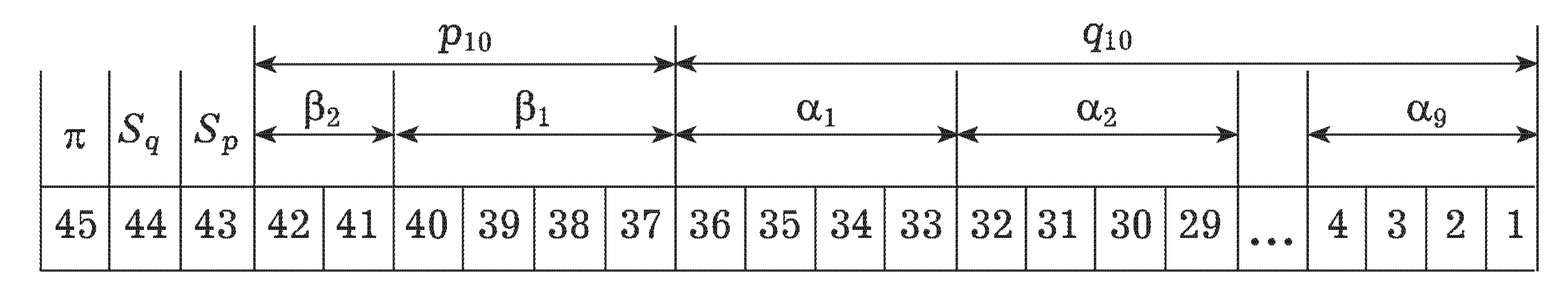


Рис. 2.3

На рис. 2.3 указано, как десятичное число (2.18)–(2.20) задается в разрядной сетке электронной машины. На изображение каждого из десятичных чисел β_1, α_1, α_2, ... , α_9 отводится по четыре двоичных разряда, так что каждое из указанных чисел может принимать любое целочисленное значение от 0 до 15, а на изображение числа β_2 отводится всего два разряда, так что β_2 может принимать значения 0, 1, 2, 3 [3]).

Стандартная программа вырабатывает по десятичному числу (2.18)–(2.20) соответствующее ему двоичное число x_2. Эта программа реализуется следующим образом. Сначала вычисляется величина γ:

$$\gamma = (1 - 2S_q)(\alpha_1 \cdot 10^9 + \alpha_2 \cdot 10^8 + \cdots + \alpha_9) \cdot 2^{68}.$$

Затем указанная величина γ умножается на величину $k = 2^{68} \cdot 10^{-10}$ (последняя величина задается в машине также в нормализованной форме, причем обычно с избытком в две единицы младшего разряда мантиссы).

Произведение $k\gamma$ отвечает, очевидно, десятичной мантиссе (2.19). Дальнейшая процедура заключается в умножении $k\gamma$ на 10 или 1/10 в зависимости от знака p_{10} (т. е. от S_p), производимом столько раз, какова величина $|p_{10}|$. В завершение программы в полученном результате обычно очищают три младших разряда мантиссы.

Указанная программа 1) обеспечивает по крайней мере 30 верных двоичных знаков результата, 2) обеспечивает перевод в двоичное число любого целого десятичного числа в диапазоне от 0 до 50 000, 3) обеспечивает перевод десятично нормализованного числа в двоично нормализованное число [4]).

---

[1]) Таким образом, множитель $(1 - 2S_q)$ в равенстве (2.19) характеризует знак мантиссы q_{10}.

[2]) Так что множитель $(1-2S_p)$ в равенстве (2.20) характеризует знак порядка p_{10}.

[3]) На самом деле, в силу конструкции клавишного устройства, на этом устройстве нельзя пробить каждое из чисел β_1, α_1, α_2, ... , α_9 бо́льшим девяти, а число β_2 нельзя пробить бо́льшим единицы. Таким образом, каждое из чисел $\beta_1, \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_9$ меняется в диапазоне от 0 до 9, а число β_2 принимает значения 0 и 1.

[4]) Если исходное десятичное число не являлось нормализованным (т. е. в (2.19) нарушалось условие $\alpha_1 \geqslant 1$), то и результат его перевода в двоичную систему может оказаться ненормализованным.

В заключение заметим, что если при реализации указанной программы в процессе умножения на 10 двоичный порядок переводимого числа превышает 59, то дальнейшие умножения на 10 прекращаются, даже если они требуются в соответствии с величиной $|p_{10}|$.

Перевод чисел из двоичной системы счисления в десятичную. Укажем стандартную программу, которая вырабатывает по заданному в нормализованной форме двоичному числу $x = q_2 \cdot 2^{p_2}$ соответствующее ему десятичное число x_{10}, записанное в нормализованной форме (2.18)–(2.20). В разрядной сетке машины вырабатываемое число располагается так, как указано на рис. 2.3.

Программа реализуется следующим образом. Сначала исходное число x_2 множится на $1/10$ для того, чтобы при последующем умножении на 10 не получить машинного переполнения. Затем полученное число множится на 10 или $1/10$ в зависимости от того, больше оно единицы или нет, до тех пор, пока результат умножений не попадет в интервал от $1/10$ до 1. Количество произведенных умножений, очевидно, определяет $|p_{10}|$. Что же касается знака p_{10}, то он положителен, если исходное число превосходит единицу, и отрицателен в противном случае.

Далее очевидно, что полученное в результате умножений число и будет десятичной мантиссой q_{10}. Цифры $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_9$ десятичной мантиссы q_{10} определяются последовательно путем умножения на 10 и выделения целой части.

ДОПОЛНЕНИЕ 2

ОБ ОШИБКАХ В ОКРУГЛЕНИИ ЧИСЕЛ В СИСТЕМАХ СЧИСЛЕНИЯ С ЧЕТНЫМ И НЕЧЕТНЫМ ОСНОВАНИЯМИ

Предположим, что вычислительная машина работает с t-разрядными числами в системе счисления с основанием $p \geqslant 2$. Тогда, не уменьшая общности, можно считать, что все числа $x^{(t)}$, хранящиеся в памяти машины, имеют вид

$$x^{(t)} = a_1 p^{-1} + a_2 p^{-2} + \cdots + a_t p^{-t},$$

где коэффициенты a_i $(i = 1, 2, \ldots, t)$ могут принимать значения $0, 1, \ldots$ $\ldots, (p-1)$. Совершенно ясно, что такие операции, как сложение, умножение или деление, будучи произведены над t-разрядными числами, могут дать в результате числа, содержащие более чем t разрядов, и поэтому естественно возникает необходимость в округлении указанных чисел до t разрядов.

Рассмотрим простейшую операцию — округление чисел, содержащих $t + r$ (где $r > 0$) разрядов, до чисел, содержащих t разрядов. Каким бы способом ни производилось округление содержащего $(t + r)$ разрядов числа $x^{(t+r)}$, результатом округления должно быть t-разрядное число. Отсюда вытекает, что ошибка округления числа $x^{(t+r)}$ (обозначим эту ошибку символом $\varepsilon(x^{(t+r)})$) имеет следующий вид:

$$\varepsilon(x^{(t+r)}) = -ip^{-(t+r)} + m(i) \cdot p^{-t}.$$

Здесь i может принимать значения $0, 1, \ldots, p^r - 1$ в зависимости от значения последних r разрядов числа $x^{(t+r)}$ а от $m(i)$ — некоторая функция от i, принимающая целочисленные значения и зависящая от выбранного способа округления.

Наиболее важной характеристикой ошибки округления является ее среднее значение Δ, которое определяется как дробь [1])

$$\Delta = \frac{\sum \varepsilon(x^{(t+r)})}{n^{(t+r)}},$$

в числителе которой стоит сумма ошибок, соответствующих всем допустимым значениям чисел $x^{(t+r)}$, а в знаменателе — количество таких чисел $x^{(t+r)}$.

Предположим, что все рассматриваемые числа $x^{(t+r)}$ удовлетворяют неравенствам $0 \leqslant x^{(t+r)} < 1$. Тогда, очевидно, количество $n^{(t+r)}$ всех чисел $x^{(t+r)}$ будет равно p^{t+r}, и мы получим после несложных вычислений, что

$$\Delta = \frac{\sum[-ip^{-(t+r)} + m(i)\cdot p^{-t}]}{p^{t+r}} = p^{-(t+r)}\left\{\sum_{i=0}^{p^r-1} m(i) - \frac{p^r-1}{2}\right\}.$$

Сумма $\sum m(i)$, стоящая под знаком фигурной скобки, зависит от выбранного нами способа округления, но в любом случае эта сумма будет целочисленной. Второй член под знаком фигурной скобки $\frac{p^r-1}{2}$ при любом *четном* p не будет целым. Таким образом, при любом четном основании p средняя ошибка Δ не равна нулю. Это означает, что при любом фиксированном способе округления, определяемом лишь отбрасываемыми разрядами, ошибка от округления до меньшего числа разрядов будет иметь систематическое смещение при любой системе счисления с четным основанием. С другой стороны, легко проверить, что обычное «школьное» правило округления в любой системе с нечетным основанием приводит к «несмещенным» ошибкам.

---

[1]) Символ $\sum$ есть символ суммирования тех слагаемых, которые записаны вслед за этим символом. Если указанные слагаемые зависят от номера i, то запись $\sum\limits_{i=m}^{n}$ обозначает, что нужно произвести суммирование по всем значениям i от m до n.

ГЛАВА 3

ПРЕДЕЛ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Одной из основных операций математического анализа является операция предельного перехода. Эта операция встречается в анализе в различных формах. В настоящей главе рассматривается простейшая форма операции предельного перехода, основанная на понятии предела так называемой числовой последовательности. Понятие предела числовой последовательности позволит нам в дальнейшем определить и другие формы операции предельного перехода.

§ 1. Числовые последовательности

1. Числовые последовательности и операции над ними. Из элементарного курса читатель имеет представление о числовых последовательностях. Примерами числовых последовательностей могут служить: 1) последовательность всех элементов арифметической и геометрической прогрессии, 2) последовательность периметров правильных n-угольников, вписанных в данную окружность, 3) последовательность $x_1 = 1$, $x_2 = 1,4$, $x_3 = 1,41\ldots$ приближенных значений числа $\sqrt{2}$. Этот пункт мы начнем с уточнения понятия числовой последовательности.

Если каждому числу n натурального ряда чисел $1, 2, \ldots \ldots$, $n, \ldots$ ставится в соответствие по определенному закону некоторое вещественное число x_n, то множество занумерованных вещественных чисел

$$x_1, x_2, \ldots, x_n, \ldots \tag{3.1}$$

мы и будем называть числовой последовательностью или просто последовательностью.

Числа x_n будем называть *элементами* или *членами* последовательности (3.1). Сокращенно последовательность (3.1) будем обозначать символом $\{x_n\}$. Так, например, символом $\{1/n\}$ будем обозначать последовательность $1, 1/2, \ldots, 1/n, \ldots$, а символом $\{1 + (-1)^n\}$ — последовательность $0, 2, 0, 2, \ldots$

Введем понятие арифметических операций над числовыми последовательностями. Пусть даны произвольные последовательности $x_1, x_2, \ldots, x_n, \ldots$ и $y_1, y_2, \ldots, y_n, \ldots$ *Суммой* этих последовательностей назовем последовательность $x_1 + y_1, x_2 + y_2, \ldots, x_n + y_n, \ldots$ (или $\{x_n + y_n\}$), *разностью* — последовательность $x_1 - y_1, x_2 - y_2, \ldots, x_n - y_n, \ldots$ (или $\{x_n - y_n\}$), *произведением* — последовательность $x_1 \cdot y_1, x_2 \cdot y_2, \ldots, x_n \cdot y_n, \ldots$ (или $\{x_n \cdot y_n\}$), *частным* — последовательность $\frac{x_1}{y_1}, \frac{x_2}{y_2}, \ldots, \frac{x_n}{y_n}, \ldots$ $\left(\text{или } \left\{\frac{x_n}{y_n}\right\}\right)$.

З а м е ч а н и е. При определении частного $\left\{\frac{x_n}{y_n}\right\}$ нужно требовать, чтобы *все элементы* y_n последовательности $\{y_n\}$ были отличны от нуля. Однако если у последовательности $\{y_n\}$ обращается в нуль *лишь конечное число элементов*, то частное $\left\{\frac{x_n}{y_n}\right\}$ можно определить с того номера, начиная с которого все элементы y_n отличны от нуля.

2. Ограниченные и неограниченные последовательности.

Определение 1. *Последовательность* $\{x_n\}$ *называется* *о г р а н и ч е н н о й с в е р х у* (*с н и з у*), *если существует такое вещественное число* M (*число* m), *что каждый элемент* x_n *последовательности* $\{x_n\}$ *удовлетворяет неравенству* $x_n \leqslant M$ ($x_n \geqslant m$)[1].

При этом число M (число m) называется *верхней гранью* (*нижней гранью*) последовательности $\{x_n\}$, а неравенство $x_n \leqslant M$ ($x_n \geqslant m$) называется *условием ограниченности* последовательности сверху (снизу).

Отметим, что любая ограниченная сверху последовательность $\{x_n\}$ имеет бесчисленное множество верхних граней. В самом деле, если M — верхняя грань, то любое число M^*, большее M, также является верхней гранью. Подчеркнем, что в условии $x_n \leqslant M$ ограниченности последовательности $\{x_n\}$ сверху в качестве M может рассматриваться любая из верхних граней. Аналогичные замечания можно сделать в отношении нижних граней ограниченной снизу последовательности $\{x_n\}$.

Определение 2. *Последовательность* $\{x_n\}$ *называется ограниченной с обеих сторон или просто* *о г р а н и ч е н н о й*, *если она ограничена и сверху, и снизу, т. е. если существуют числа* m *и* M *такие, что любой элемент* x_n *этой последовательности удовлетворяет неравенствам:* $m \leqslant x_n \leqslant M$.

[1]) Это определение полностью аналогично определению ограниченного сверху (снизу) множества вещественных чисел (см. п. 5 § 1 гл. 2).

Если последовательность $\{x_n\}$ ограничена и M и m — ее верхняя и нижняя грани, то все элементы x_n этой последовательности удовлетворяют неравенству

$$|x_n| \leqslant A, \tag{3.2}$$

где A — максимальное из двух чисел $|M|$ и $|m|$. Обратно, если все элементы последовательности $\{x_n\}$ удовлетворяют неравенству (3.2), то выполняются также неравенства $-A \leqslant x_n \leqslant A$, и, следовательно, последовательность $\{x_n\}$ ограничена. Таким образом, неравенство (3.2) представляет собой другую форму условия ограниченности последовательности. Уточним понятие неограниченной последовательности. *Последовательность* $\{x_n\}$ *называется неограниченной, если для любого положительного числа* A *найдется элемент* x_n *этой последовательности, удовлетворяющий неравенству* $|x_n| > A$. Рассмотрим несколько примеров:

1) Последовательность $-1, -4, -9, \ldots, -n^2, \ldots$ ограничена сверху и не ограничена снизу. Верхней гранью этой последовательности является любое число, не меньшее -1.

2) Последовательность $1, 1/2, 1/3, \ldots, 1/n, \ldots$ ограничена. Действительно, верхней гранью этой последовательности является любое число $M \geqslant 1$, а нижней гранью — любое число $m \leqslant 0$.

3) Последовательность $1, 2, 1, 3, \ldots, 1, n, 1, (n+1), \ldots$ не ограничена. В самом деле, каково бы ни было положительное число A, среди элементов этой последовательности (с четными номерами) найдутся элементы, превосходящие A.

3. Бесконечно большие и бесконечно малые последовательности.

Определение 1. *Последовательность* $\{x_n\}$ *называется* б е с к о н е ч н о б о л ь ш о й, *если для любого положительного числа* A [1]) *можно указать номер* N *такой* [2]), *что при* $n \geqslant N$ *все элементы* x_n *этой последовательности удовлетворяют неравенству* $|x_n| > A$.

З а м е ч а н и е. Очевидно, что любая бесконечно большая последовательность является неограниченной, поскольку для любого $A > 0$ можно указать номер N такой, что при $n > N$ *все элементы* x_n удовлетворяют неравенству $|x_n| > A$, а следовательно, для любого $A > 0$ найдется по крайней мере один такой элемент x_n, что $|x_n| > A$. Однако неограниченная последовательность может и не быть бесконечно большой. Например, неограниченная последовательность $1, 2, 1, 3, \ldots, 1, n, \ldots$ не является бесконечно большой, поскольку при $A > 1$ неравенство $|x_n| > A$ не имеет места *для всех* x_n с нечетными номерами.

---

[1]) Сколь бы большим мы его ни взяли.

[2]) Так как номер N зависит от числа A, то иногда пишут $N = N(A)$.

Определение 2. *Последовательность* $\{\alpha_n\}$ [1]) *называется* *бесконечно малой*, *если для любого положительного числа* ε [2]) *можно указать номер* N *такой* [3]), *что при* $n \geqslant N$ *все элементы* α_n *этой последовательности удовлетворяют неравенству* $|\alpha_n| < \varepsilon$.

Рассмотрим следующие примеры:

1. Докажем, что последовательность $q, q^2, q^3, \ldots, q^n, \ldots$ при $|q| > 1$ является бесконечно большой, а при $|q| < 1$ — бесконечно малой.

Сначала рассмотрим случай $|q| > 1$. Тогда $|q| = 1 + \delta$, где $\delta > 0$. Используя формулу бинома Ньютона, получим $|q|^N = (1+\delta)^N = 1 + \delta N +$ положительные члены). Отсюда

$$|q|^N > \delta N. \tag{3.3}$$

Фиксируем произвольное число $A > 0$ и выберем номер N столь большим, чтобы имело место неравенство $\delta N > A$ [4]). Из последнего неравенства и неравенства (3.3) вытекает неравенство $|q|^N > A$. Так как при $n \geqslant N$ и при $|q| > 1$ $|q|^n \geqslant |q|^N$ (в силу свойств произведения вещественных чисел), то $|q|^n > A$ при $n \geqslant N$. Тем самым доказано, что при $|q| > 1$ рассматриваемая последовательность является бесконечно большой.

Случай $|q| < 1$ рассматривается совершенно аналогично. В этом случае $\dfrac{1}{|q|} = 1 + \delta$, где $\delta > 0$ (мы опустили случай $q = 0$). Снова используя формулу бинома Ньютона, мы получим вместо (3.3) следующее неравенство:

$$\frac{1}{|q|^N} > \delta N, \quad \text{или} \quad |q|^N < \frac{1}{\delta N}. \tag{3.3*}$$

Фиксируем произвольное $\varepsilon > 0$ и выберем номер N из условия $\dfrac{1}{\delta N} < \varepsilon$ [5]). Так как $|q|^n \leqslant |q|^N$ при $n \geqslant N$ и при $|q| < 1$, то из полученных неравенств вытекает, что $|q|^n < \varepsilon$ при $n \geqslant N$. Тем самым доказано, что при $|q| < 1$ рассматриваемая последовательность является бесконечно малой.

2. Докажем, что последовательность $1, 1/2, \ldots, 1/n, \ldots$ бесконечно малая. В самом деле, если $n \geqslant N$, то $1/n \leqslant 1/N$. Поэтому по данному ε достаточно выбрать номер N из условия $1/N < \varepsilon$. Например, можно положить $N = [1/\varepsilon] + 1$.

---

[1]) Элементы бесконечно малых последовательностей мы, как правило, будем обозначать греческими буквами.

[2]) Сколь бы малым мы его ни взяли.

[3]) Так как номер N зависит от числа ε, то иногда пишут $N = N(\varepsilon)$.

[4]) Достаточно положить $N = [A/\delta] + 1$, где символ $[x]$ обозначает целую часть числа x. Например, $[5,138] = 5$, $[-172,9] = -173$.

[5]) Достаточно положить $N = [1/(\delta\varepsilon)] + 1$.

4. Основные свойства бесконечно малых последовательностей.

Теорема 3.1. *Сумма двух бесконечно малых последовательностей есть бесконечно малая последовательность.*

Доказательство. Пусть $\{\alpha_n\}$ и $\{\beta_n\}$ — бесконечно малые последовательности. Докажем, что последовательность $\{\alpha_n+\beta_n\}$ — бесконечно малая. Пусть ε — произвольное положительное число, N_1 — номер, начиная с которого $|\alpha_n| < \varepsilon/2$, а N_2 — номер, начиная с которого $|\beta_n| < \varepsilon/2$. (Такие номера N_1 и N_2 найдутся по определению бесконечно малой последовательности.) Так как модуль суммы двух чисел не превосходит суммы их модулей, т. е. $|\alpha_n + \beta_n| \leqslant |\alpha_n| + |\beta_n|$ (см. п. 4 § 2 гл. 2), то, обозначив через N наибольший из двух номеров N_1 и N_2, мы получим, что, начиная с номера N, выполняется неравенство $|\alpha_n + \beta_n| < \varepsilon$. Это означает, что последовательность $\{\alpha_n + \beta_n\}$ бесконечно малая. Теорема доказана.

Теорема 3.2. *Разность двух бесконечно малых последовательностей есть бесконечно малая последовательность.*

Эта теорема доказывается аналогично предыдущей, только вместо неравенства $|\alpha_n + \beta_n| \leqslant |\alpha_n| + |\beta_n|$ следует взять неравенство $|\alpha_n - \beta_n| \leqslant |\alpha_n| + |\beta_n|$.

Следствие. *Алгебраическая сумма любого конечного числа бесконечно малых последовательностей — бесконечно малая последовательность.*

Теорема 3.3. *Бесконечно малая последовательность ограничена.*

Доказательство. Пусть $\{\alpha_n\}$ — бесконечно малая последовательность и ε — некоторое положительное число. Пусть, далее, N — номер, начиная с которого $|\alpha_n| < \varepsilon$. Обозначим через A наибольшее из следующих N чисел: $\varepsilon, |\alpha_1|, |\alpha_2|, \ldots, |\alpha_{N-1}|$. Это можно записать так: $A = \max\{\varepsilon, |\alpha_1|, |\alpha_2|, \ldots, |\alpha_{N-1}|\}$ [1]). Очевидно, $|\alpha_n| \leqslant A$ *для любого номера* n, что означает ограниченность последовательности. Теорема доказана.

Теорема 3.4. *Произведение ограниченной последовательности на бесконечно малую последовательность представляет собой бесконечно малую последовательность.*

Доказательство. Пусть $\{x_n\}$ — ограниченная , а $\{\alpha_n\}$ — бесконечно малая последовательности. Так как последовательность $\{x_n\}$ ограничена, то существует число $A > 0$ такое, что любой элемент x_n удовлетворяет неравенству $|x_n| \leqslant A$. Возьмем произвольное положительное число ε. Поскольку последовательность $\{\alpha_n\}$ бесконечно малая, то для положитель-

[1]) Здесь и в дальнейшем символ $a = \max\{a_1, a_2, \ldots, a_n\}$ означает, что число a равно максимальному из чисел $a_1, a_2, \ldots, a_n$.

ного числа ε/A можно указать номер N такой, что при $n \geqslant N$ выполняется неравенство $|\alpha_n| < \varepsilon/A$. Тогда при $n \geqslant N$ $|x_n{\cdot}\alpha_n| = |x_n| \cdot |\alpha_n| < A\frac{\varepsilon}{A} = \varepsilon$. Поэтому последовательность $\{x_n \cdot \alpha_n\}$ бесконечно малая. Теорема доказана.

Следствие. *Произведение любого конечного числа бесконечно малых последовательностей представляет собой бесконечно малую последовательность.*

Замечание. Частное двух бесконечно малых последовательностей может быть последовательностью любого типа и даже может не иметь смысла. Если, например, $\alpha_n = 1/n$, $\beta_n = 1/n$, то все элементы последовательности $\left\{\frac{\alpha_n}{\beta_n}\right\}$ равны единице. Если $\alpha_n = 1/n$, $\beta_n = 1/n^2$, то последовательность $\left\{\frac{\alpha_n}{\beta_n}\right\}$ бесконечно большая, и наоборот, если $\alpha_n = 1/n^2$, а $\beta_n = 1/n$, то последовательность $\left\{\frac{\alpha_n}{\beta_n}\right\}$ бесконечно малая. Если бесконечно много элементов последовательности $\{\beta_n\}$ равны нулю, то частное $\left\{\frac{\alpha_n}{\beta_n}\right\}$ не имеет смысла.

Теорема 3.5. *Если все элементы бесконечно малой последовательности $\{\alpha_n\}$ равны одному и тому же числу c, то $c = 0$.*

Доказательство. Допустим, что $c \neq 0$. Положим $\varepsilon = |\,c\,|/2$, $\varepsilon > 0$. Начиная с номера N, соответствующего этому ε, выполняется неравенство $|\alpha_n| < \varepsilon$. Так как $\alpha_n = c$, а $\varepsilon = |\,\varepsilon\,|/2$, то последнее неравенство можно переписать следующим образом: $|\,c\,| < |\,c\,|/2$, откуда $1 < 1/2$. Полученное противоречие показывает, что предположение $c \neq 0$ не может иметь места. Итак, $c = 0$. Теорема доказана.

В заключение отметим предложение, устанавливающее связь между бесконечно большими и бесконечно малыми последовательностями.

Теорема 3.6. *Если $\{x_n\}$ — бесконечно большая последовательность, то, начиная с некоторого номера n, определена последовательность $\{1/x_n\}$, которая является бесконечно малой. Если все элементы бесконечно малой последовательности $\{\alpha_n\}$ не равны нулю, то последовательность $\{1/\alpha_n\}$ бесконечно большая.*

Доказательство. Отметим, во-первых, что у бесконечно большой последовательности лишь конечное число элементов может быть равно нулю. В самом деле, из определения бесконечно большой последовательности вытекает, что для данного положительного числа A можно указать такой номер N^*, начиная с которого выполняется неравенство $|x_n| > A$. Это означает, что при $n \geqslant N^*$ все элементы x_n не равны нулю, а поэтому по-

следовательность $\{1/x_n\}$ имеет смысл, если ее элементы рассматривать начиная с номера N^*. Докажем теперь, что $\{1/x_n\}$ — бесконечно малая последовательность. Пусть ε — любое положительное число. Для числа $1/\varepsilon$ можно указать номер $N \geqslant N^*$ такой, что при $n \geqslant N$ элементы x_n последовательности $\{x_n\}$ удовлетворяют неравенству $|x_n| > 1/\varepsilon$. Поэтому, начиная с указанного номера N, будет выполняться неравенство $|1/x_n| < \varepsilon$. Таким образом, доказано, что последовательность $\{1/x_n\}$ бесконечно малая.

Доказательство второй части теоремы проводится аналогично.

§ 2. Сходящиеся последовательности и их основные свойства

1. Понятие сходящейся последовательности.

Определение. *Последовательность $\{x_n\}$ называется* с х о д я щ е й с я, *если существует такое число a, что последовательность $\{x_n - a\}$ является бесконечно малой. При этом число a называется* п р е д е л о м п о с л е д о в а т е л ь н о с т и *$\{x_n\}$* [1].

Определение сходящейся последовательности можно, очевидно, сформулировать также и следующим образом.

Последовательность $\{x_n\}$ называется сходящейся, если существует такое число a, что для любого положительного числа ε можно указать номер N такой[2], *что при $n \geqslant N$ все элементы x_n этой последовательности удовлетворяют неравенству*

$$|x_n - a| < \varepsilon. \tag{3.4}$$

При этом число a называется пределом последовательности $\{x_n\}$.

Если последовательность $\{x_n\}$ сходится и имеет своим пределом число a, то символически это записывают так [3]:

$$\lim_{n\to\infty} x_n = a, \quad \text{или} \quad x_n \to a \quad \text{при} \quad n \to \infty.$$

---

[1] В соответствии с этим определением всякая бесконечно малая последовательность является сходящейся и имеет своим пределом число нуль.

[2] Так как N зависит от ε, то иногда пишут $N = N(\varepsilon)$.

[3] Отметим, что бесконечно большие последовательности иногда называют последовательностями, сходящимися к бесконечности. Поэтому если последовательность $\{x_n\}$ бесконечно большая, то символически это записывают так:

$$\lim_{n\to\infty} x_n = \infty.$$

Если элементы бесконечно большой последовательности, начиная с некоторого номера, имеют определенный знак, то говорят, что последовательность $\{x_n\}$ сходится к бесконечности определенного знака. Символически это записывается следующим образом:

$$\lim_{n\to\infty} x_n = +\infty, \qquad \lim_{n\to\infty} x_n = -\infty.$$

З а м е ч а н и е 1. Неравенство (3.4) эквивалентно неравенствам $-\varepsilon < x_n - a < +\varepsilon$, или $a - \varepsilon < x_n < a + \varepsilon$. Последние неравенства означают, что элемент x_n находится в ε-окрестности числа a (напомним, что ε-окрестностью числа a называется интервал $(a-\varepsilon, a+\varepsilon)$). Поэтому определение сходящейся последовательности можно сформулировать также и следующим образом.

Последовательность $\{x_n\}$ называется сходящейся, если существует число a такое, что в любой ε-окрестности числа a находятся все элементы последовательности $\{x_n\}$, начиная с некоторого номера[1]).

Определение сходящейся последовательности утверждает, что разность $x_n - a = \alpha_n$ является бесконечно малой последовательностью. Следовательно, любой элемент x_n сходящейся последовательности, имеющей пределом число a, можно представить в виде

$$x_n = a + \alpha_n, \tag{3.5}$$

где α_n — элемент бесконечно малой последовательности.

З а м е ч а н и е 2. Из определения предела последовательности очевидно, что конечное число элементов не влияет на сходимость этой последовательности и на величину ее предела.

Рассмотрим примеры сходящихся последовательностей.

1) Последовательность $\left\{\frac{n}{n+1}\right\}$ сходится; предел этой последовательности равен единице. В самом деле, так как $\frac{n}{n+1} - 1 = -\frac{1}{n+1}$, то для доказательства достаточно убедиться, что последовательность $\left\{-\frac{1}{n+1}\right\}$ бесконечно малая. Если $n \geqslant N$, то $\left|-\frac{1}{n+1}\right| \leqslant \frac{1}{N+1}$ и поэтому по данному $\varepsilon > 0$ достаточно выбрать номер N из условия $\frac{1}{N+1}$ или $N > \frac{1}{\varepsilon} - 1$. Например, можно положить

$$N = \begin{cases} \left[\frac{1}{\varepsilon} - 1\right] + 1 & \text{при } \varepsilon \leqslant 1, \\ 1 & \text{при } \varepsilon > 1. \end{cases}$$

2) Докажем, что последовательность $x_1 = 0,3$; $x_2 = 0,33$ … ; $x_n = 0,\underbrace{33\ldots3}_{n \text{ раз}}$; … сходится и имеет своим пределом число 1/3. Поскольку число 1/3 представимо бесконечной десятичной дробью $0,333\ldots$, то из правила сравнения вещественных чисел

[1]) Зависящего, конечно, от ε.

(см. п. 3 § 1 гл. 2) вытекают неравенства[1])

$$\underbrace{0,33\ldots3}_{n \text{ раз}} \leqslant \frac{1}{3} \leqslant \underbrace{0,33\ldots3}_{n \text{ раз}} + \frac{1}{10^n}.$$

Из этих неравенств получим, что $\left|x_n - \frac{1}{3}\right| < \frac{1}{10^n}$. Так как при $n \geqslant N$ $\frac{1}{10^n} \leqslant \frac{1}{10^N}$, то, выбрав по любому $\varepsilon > 0$ номер N из условия $\frac{1}{10^N} < \varepsilon$, получим $\left|x_n - \frac{1}{3}\right| < \varepsilon$ при $n \geqslant N$.

Возможность выбора номера N, удовлетворяющего условию $|q|^N < \varepsilon$ при любом $|q| < 1$, была установлена в примере 1 п. 3 § 1.

2. Основные свойства сходящихся последовательностей.

Теорема 3.7. *Сходящаяся последовательность имеет только один предел.*

Доказательство. Пусть a и b — пределы сходящейся последовательности $\{x_n\}$. Тогда, используя специальное представление (3.5) для элементов x_n сходящейся последовательности $\{x_n\}$, получим $x_n = a + \alpha_n$, $x_n = b + \beta_n$, где α_n и β_n — элементы бесконечно малых последовательностей $\{\alpha_n\}$ и $\{\beta_n\}$.

Вычитая написанные соотношения, найдем $\alpha_n - \beta_n = b - a$. Так как все элементы бесконечно малой последовательности $\{\alpha_n - \beta_n\}$ имеют одно и то же постоянное значение $b - a$, то по теореме 3.5 $b - a = 0$, т. е. $b = a$. Теорема доказана.

Теорема 3.8. *Сходящаяся последовательность ограничена.*

Доказательство. Пусть $\{x_n\}$ — сходящаяся последовательность и a — ее предел. Используя формулу (3.5), имеем

$$x_n = a + \alpha_n,$$

где α_n — элемент бесконечно малой последовательности. Так как бесконечно малая последовательность $\{\alpha_n\}$ ограничена (см. теорему 3.3), то найдется такое число A, что для всех номеров n справедливо неравенство $|\alpha_n| \leqslant A$. Поэтому $|x_n| \leqslant |a| + A$ для всех номеров n, что и означает ограниченность последовательности $\{x_n\}$. Теорема доказана.

Замечание 1. Ограниченная последовательность может и не быть сходящейся. Например, последовательность $1, -1, 1, -1, \ldots$ ограничена, но не является сходящейся. В самом деле, если бы эта последовательность сходилась к некоторому числу a, то каждая из последовательностей $\{x_n - a\}$ и $\{x_{n+1} - a\}$ являлась бы бесконечно малой. Но тогда, в силу теоремы 3.2, последовательность $\{(x_n - a) - (x_{n+1} - a)\} = x_n - x_{n+1}$ была бы бесконечно малой, что невозможно, так как $|x_n - x_{n+1}| = 2$ для любого номера n.

[1]) См. также неравенства (2.5) из п. 4 § 1 гл. 2.

Докажем следующие *основные* теоремы.

Теорема 3.9. *Сумма сходящихся последовательностей $\{x_n\}$ и $\{y_n\}$ есть сходящаяся последовательность, предел которой равен сумме пределов последовательностей $\{x_n\}$ и $\{y_n\}$.*

Доказательство. Пусть a и b — соответственно пределы последовательностей $\{x_n\}$ и $\{y_n\}$. Тогда

$$x_n = a + \alpha_n \qquad y_n = b + \beta_n,$$

где $\{\alpha_n\}$ и $\{\beta_n\}$ — бесконечно малые последовательности. Следовательно, $(x_n + y_n) - (a + b) = \alpha_n + \beta_n$.

Таким образом, последовательность $\{(x_n+y_n)-(a+b)\}$ бесконечно малая, и поэтому последовательность $\{x_n + y_n\}$ сходится и имеет своим пределом число $a + b$.

Теорема 3.10. *Разность сходящихся последовательностей $\{x_n\}$ и $\{y_n\}$ есть сходящаяся последовательность, предел которой равен разности пределов последовательностей $\{x_n\}$ и $\{y_n\}$.*

Доказательство этой теоремы аналогично доказательству теоремы 3.9.

Теорема 3.11. *Произведение сходящихся последовательностей $\{x_n\}$ и $\{y_n\}$ есть сходящаяся последовательность, предел которой равен произведению пределов последовательностей $\{x_n\}$ и $\{y_n\}$.*

Доказательство. Если a и b — пределы последовательностей $\{x_n\}$ и $\{y_n\}$ соответственно, то $x_n = a + \alpha_n$, $y_n = b + \beta_n$ и $x_n \cdot y_n = a \cdot b + a \cdot \beta_n + b \cdot \alpha_n + \alpha_n\beta_n$. Следовательно,

$$x_n \cdot y_n - a \cdot b = a \cdot \beta_n + b \cdot \alpha_n + \alpha_n \cdot \beta_n.$$

В силу теоремы 3.4 и следствия из нее, а также теоремы 3.1 последовательность $\{a \cdot \beta_n + b \cdot \alpha_n + \alpha_n \cdot \beta_n\}$ бесконечно малая, т. е. и последовательность $\{x_n \cdot y_n - a \cdot b\}$ бесконечно малая, и поэтому последовательность $\{x_n \cdot y_n\}$ сходится и имеет своим пределом число $a \cdot b$.

Для доказательства соответствующей теоремы для частного двух последовательностей нам понадобится следующая лемма.

Лемма 1. *Если последовательность $\{y_n\}$ сходится и имеет отличный от нуля предел b, то, начиная с некоторого номера, определена последовательность $\left\{\dfrac{1}{y_n}\right\}$, которая является ограниченной.*

Доказательство. Пусть $\varepsilon = |b|/2$. Так как $b \neq 0$, то $\varepsilon > 0$. Пусть N — номер, соответствующий этому ε, начиная с которого выполняется неравенство $|y_n - b| < \varepsilon$ или $|y_n - b| < |b|/2$. Из этого неравенства следует, что при $n \geqslant N$ выполняется неравенство [1] $|y_n| > |b|/2$. Поэтому при

[1]) В самом деле, так как $b = (b - y_n) + y_n$ и $|b - y_n| < |b|/2$, то $|b| \leqslant |b - y_n| + |y_n| < |b|/2 + |y_n|$.

$n \geqslant N$ имеем $\left|\dfrac{1}{y_n}\right| < \dfrac{2}{|b|}$. Следовательно, начиная с этого номера N, мы можем рассматривать последовательность $\left\{\dfrac{1}{y_n}\right\}$, и эта последовательность ограничена. Лемма 1 доказана.

Теорема 3.12. *Частное двух сходящихся последовательностей $\{x_n\}$ и $\{y_n\}$ при условии, что предел $\{y_n\}$ отличен от нуля, есть сходящаяся последовательность, предел которой равен частному пределов последовательностей $\{x_n\}$ и $\{y_n\}$.*

Доказательство. Из доказанной леммы 1 следует, что, начиная с некоторого номера N, элементы последовательности $\{y_n\}$ отличны от нуля и последовательность $\left\{\dfrac{1}{y_n}\right\}$ ограничена. Начиная с этого номера, мы и будем рассматривать последовательность $\left\{\dfrac{x_n}{y_n}\right\}$. Пусть a и b — пределы последовательностей $\{x_n\}$ и $\{y_n\}$. Докажем, что последовательность $\left\{\dfrac{x_n}{y_n} - \dfrac{a}{b}\right\}$ бесконечно малая. В самом деле, так как $x_n = a + \alpha_n$, $y_n = b + \beta_n$, то

$$\frac{x_n}{y_n} - \frac{a}{b} = \frac{x_n \cdot b - y_n \cdot a}{y_n \cdot b} = \frac{1}{y_n}\left(\alpha_n - \frac{a}{b}\,\beta_n\right).$$

Так как последовательность $\left\{\dfrac{1}{y_n}\right\}$ ограничена, а последовательность $\left\{\alpha_n - \dfrac{a}{b}\,\beta_n\right\}$ бесконечно малая, то последовательность $\left\{\dfrac{1}{y_n}\left(\alpha_n - \dfrac{a}{b}\,\beta_n\right)\right\} \equiv \left\{\dfrac{x_n}{y_n} - \dfrac{a}{b}\right\}$ бесконечно малая. Теорема доказана.

3. Предельный переход в неравенствах. Мы только что выяснили, что арифметические операции над сходящимися последовательностями приводят к таким же арифметическим операциям над их пределами. В этом пункте мы покажем, что неравенства, которым удовлетворяют элементы сходящихся последовательностей, в пределе переходят в соответствующие неравенства для пределов этих последовательностей.

Теорема 3.13. *Если элементы сходящейся последовательности $\{x_n\}$, начиная с некоторого номера, удовлетворяют неравенству $x_n \geqslant b$ $(x_n \leqslant b)$, то и предел a этой последовательности удовлетворяет неравенству $a \geqslant b$ $(a \leqslant b)$.*

Доказательство. Пусть все элементы x_n, по крайней мере начиная с некоторого номера, удовлетворяют неравенству $x_n \geqslant b$. Требуется доказать неравенство $a \geqslant b$. Предположим, что $a < b$. Поскольку a — предел последовательности $\{x_n\}$, то для положительного $\varepsilon = b - a$ можно указать номер N такой, что при $n \geqslant N$ выполняется неравенство $|x_n - a| < b - a$. Это неравенство эквивалентно следующим двум неравенствам: $-(b - a) < x_n - a < b - a$. Используя правое из этих неравенств,

мы получим $x_n < b$, а это противоречит условию теоремы. Случай $x_n \leqslant b$ рассматривается аналогично. Теорема доказана.

Замечание. Элементы сходящейся последовательности $\{x_n\}$ могут удовлетворять строгому неравенству $x_n > b$, однако при этом предел a может оказаться равным b. Например, если $x_n = \frac{1}{n}$, то $x_n > 0$, однако $\lim\limits_{n\to\infty} x_n = 0$.

Следствие 1. *Если элементы x_n и y_n сходящихся последовательностей $\{x_n\}$ и $\{y_n\}$, начиная с некоторого номера, удовлетворяют неравенству $x_n \leqslant y_n$, то их пределы удовлетворяют такому же неравенству:*

$$\lim_{n\to\infty} x_n \leqslant \lim_{n\to\infty} y_n.$$

В самом деле, элементы последовательности $\{y_n - x_n\}$ неотрицательны, а поэтому неотрицателен и ее предел $\lim\limits_{n\to\infty}(y_n - x_n) = \lim\limits_{n\to\infty} y_n - \lim\limits_{n\to\infty} x_n$. Отсюда следует, что

$$\lim_{n\to\infty} x_n \leqslant \lim_{n\to\infty} y_n.$$

Следствие 2. *Если все элементы сходящейся последовательности $\{x_n\}$ находятся на сегменте $[a, b]$, то и ее предел c также находится на этом сегменте.*

В самом деле, так как $a \leqslant x_n \leqslant b$, то $a \leqslant c \leqslant b$.

Следующая теорема играет важную роль в различных приложениях.

Теорема 3.14. *Пусть $\{x_n\}$ и $\{z_n\}$ — сходящиеся последовательности, имеющие общий предел a. Пусть, кроме того, начиная с некоторого номера, элементы последовательности $\{y_n\}$ удовлетворяют неравенствам $x_n \leqslant y_n \leqslant z_n$. Тогда последовательность $\{y_n\}$ сходится и имеет предел a.*

Доказательство. Нам достаточно доказать, что последовательность $\{y_n - a\}$ является бесконечно малой. Обозначим через N^* номер, начиная с которого выполняются неравенства, указанные в условии теоремы. Тогда, начиная с этого же номера, будут выполняться также неравенства $x_n - a \leqslant y_n - a \leqslant z_n - a$. Отсюда следует, что при $n \geqslant N^*$ элементы последовательности $\{y_n - a\}$ удовлетворяют неравенству

$$|\,y_n - a\,| \leqslant \max\{|\,x_n - a\,|,\ |\,z_n - a\,|\}.$$

Так как $\lim\limits_{n\to\infty} x_n = a$ и $\lim\limits_{n\to\infty} z_n = a$, то для любого $\varepsilon > 0$ можно указать номера N_1 и N_2 такие, что при $n \geqslant N_1$ $|\,x_n - a\,| < \varepsilon$, а при $n \geqslant N_2$ $|\,z_n - a\,| < \varepsilon$. Пусть $N = \max\{N^*, N_1, N_2\}$. Начиная с этого номера, имеет место неравенство $|\,y_n - a\,| < \varepsilon$. Итак, последовательность $\{y_n - a\}$ — бесконечно малая. Теорема доказана.

§ 3. Монотонные последовательности

1. Определение монотонных последовательностей.

Определение. *Последовательность $\{x_n\}$ называется неубывающей (невозрастающей), если каждый последующий член этой последовательности не меньше (не больше) предыдущего, т. е. если для всех номеров n справедливо неравенство*

$$x_n \leqslant x_{n+1} \qquad (x_n \geqslant x_{n+1}).$$

Неубывающие и невозрастающие последовательности объединяются общим наименованием *монотонные последовательности*. Если элементы монотонной последовательности $\{x_n\}$ для всех номеров n удовлетворяют неравенству $x_n < x_{n+1}$ $(x_n > x_{n+1})$, то последовательность $\{x_n\}$ называется *возрастающей* (*убывающей*). Возрастающие и убывающие последовательности называются также *строго монотонными*.

Монотонные последовательности ограничены либо сверху, либо снизу. Именно: *невозрастающие* последовательности *ограничены сверху*, а *неубывающие* последовательности *ограничены снизу* своими первыми элементами. Поэтому невозрастающая последовательность будет ограниченной с двух сторон, если она ограничена снизу, а неубывающая последовательность будет ограниченной с двух сторон, если она ограничена сверху.

Рассмотрим примеры монотонных последовательностей.

1. Последовательность $1, 1, 1/2, 1/2, \ldots, 1/n, 1/n, \ldots$ невозрастающая. Она ограничена сверху своим первым элементом, равным единице, а снизу числом нуль.

2. Последовательность $1, 1, 2, 2, \ldots, n, n, \ldots$ неубывающая. Она ограничена снизу своим первым элементом, равным единице, а сверху не ограничена.

3. Последовательность $1/2, 2/3, 3/4, \ldots, n/(n+1), \ldots$ возрастающая. Она ограничена с обеих сторон: снизу своим первым элементом $1/2$, а сверху, например, числом единица.

2. Признак сходимости монотонной последовательности. Имеет место следующая *основная* теорема.

Теорема 3.15. *Если неубывающая (невозрастающая) последовательность $\{x_n\}$ ограничена сверху (снизу), то она сходится.*

Согласно предыдущему пункту последовательность $\{x_n\}$, удовлетворяющая условию теоремы 3.15, является ограниченной. Поэтому теорему 3.15 можно кратко сформулировать так: *если монотонная последовательность $\{x_n\}$ ограничена с обеих сторон, то она сходится.*

Доказательство. Так как последовательность $\{x_n\}$ ограничена, то множество ее элементов имеет точные верхнюю и нижнюю грани $\overline{x}$ и $\underline{x}$ (см. теорему 2.1). Докажем, что если

$\{x_n\}$ — неубывающая последовательность, то ее пределом будет указанная точная верхняя грань $\overline{x}$; если же $\{x_n\}$ — невозрастающая последовательность, то ее пределом будет указанная точная нижняя грань $\underline{x}$. Мы ограничимся случаем неубывающей последовательности, поскольку для невозрастающей последовательности рассуждения аналогичны.

Поскольку $\overline{x}$ — точная верхняя грань множества элементов последовательности $\{x_n\}$, то для любого $\varepsilon > 0$ можно указать элемент x_N такой, что $x_N > \overline{x} - \varepsilon$ и $x_N \leqslant \overline{x}$ (любой элемент x_n не больше точной верхней грани $\overline{x}$, $x_n \leqslant \overline{x}$). Сопоставляя указанные неравенства, получим неравенства $0 \leqslant \overline{x} - x_N < \varepsilon$. Так как $\{x_n\}$ — неубывающая последовательность, то при $n \geqslant N$ справедливы неравенства $x_N \leqslant x_n \leqslant \overline{x}$. Отсюда следует, что при $n \geqslant N$ выполняются неравенства $0 \leqslant \overline{x} - x_n \leqslant \overline{x} - x_N$. Выше мы отмечали, что $\overline{x} - x_N < \varepsilon$, поэтому при $n \geqslant N$ справедливы неравенства $0 \leqslant \overline{x} - x_n < \varepsilon$, из которых вытекает неравенство $|\,x_n - \overline{x}\,| < \varepsilon$. Таким образом, установлено, что $\overline{x}$ — предел последовательности $\{x_n\}$. Теорема доказана.

З а м е ч а н и е 1. *Условие ограниченности монотонной последовательности представляет собой необходимое и достаточное условие ее сходимости.*

В самом деле, если монотонная последовательность ограничена, то в силу теоремы 3.15 она сходится; если же монотонная последовательность сходится, то в силу теоремы 3.8 она ограничена.

З а м е ч а н и е 2. Сходящаяся последовательность может и не быть монотонной. Например, последовательность $\{x_n\}$, для которой $x_n = (-1)^n/n$ сходится и имеет пределом число нуль. Так как знаки элементов этой последовательности чередуются, то она не является монотонной.

З а м е ч а н и е 3. Если последовательность $\{x_n\}$ неубывающая и ограниченная и $\overline{x}$ — ее предел, то для всех номеров n справедливо неравенство $x_n \leqslant \overline{x}$. Элементы невозрастающей ограниченной последовательности $\{x_n\}$, сходящейся к $\underline{x}$, удовлетворяют неравенству $\underline{x} \leqslant x_n$. Справедливость этого утверждения была установлена в процессе доказательства теоремы 3.15.

Следствие из теоремы 3.15. *Пусть дана бесконечная система сегментов $[a_1, b_1]$, $[a_2, b_2]$, $[a_3, b_3]$, ..., $[a_n, b_n]$, ..., каждый последующий из которых содержится в предыдущем*[1] *и пусть разность $b_n - a_n$ (будем называть ее длиной сегмента $[a_n, b_n]$) стремится к нулю при $n \to \infty$ (систему сегментов, обладающую этими свойствами, будем называть стягивающейся). Тогда существует, и притом единственная, точка c, принадлежащая всем сегментам этой системы.*

[1] Это означает, что $a_{n-1} \leqslant a_n \leqslant b_n \leqslant b_{n-1}$.

Доказательство. Прежде всего заметим, что точка c, принадлежащая всем сегментам, может быть только одна. В самом деле, если бы нашлась еще одна точка d, принадлежащая всем сегментам, то весь сегмент[1] $[c, d]$ принадлежал бы всем сегментам $[a_n, b_n]$. Но тогда для любого номера n выполнялись бы неравенства $b_n - a_n \geqslant d - c > 0$, а это невозможно, ибо $b_n - a_n \to 0$ при $n \to \infty$. Докажем теперь, что *существует* точка c, принадлежащая всем сегментам $[a_n, b_n]$. Так как система сегментов является стягивающейся, то последовательность левых концов $\{a_n\}$ является неубывающей, а последовательность правых концов $\{b_n\}$ невозрастающей. Поскольку обе эти последовательности ограничены (все элементы последовательностей $\{a_n\}$ и $\{b_n\}$ находятся на сегменте $[a_1, b_1]$), то по теореме 3.15 обе они сходятся. Из того, что разность $b_n - a_n$ является бесконечно малой, вытекает, что указанные последовательности имеют общий предел. Обозначим этот предел через c. Из замечания 3 вытекает, что для любого номера n справедливы неравенства $a_n \leqslant c \leqslant b_n$, т. е. точка c принадлежит всем сегментам $[a_n, b_n]$.

3. Некоторые примеры сходящихся монотонных последовательностей. Рассмотрим примеры последовательностей, для нахождения предела которых будет использована теорема 3.15 о пределе монотонной последовательности. Кроме того, в этом пункте мы познакомимся с одним общим приемом нахождения пределов последовательностей, задаваемых рекуррентными формулами[2].

Пример 1. Рассмотрим последовательность $\{x_n\}$, элемент x_n которой равен

$$x_n = \sqrt{a + \sqrt{a + \sqrt{a + \ldots + \sqrt{a}}}}, \quad a > 0.$$

Эту же последовательность можно, очевидно, задать следующей рекуррентной формулой:

$$x_1 = \sqrt{a}, \quad x_n = \sqrt{a + x_{n-1}}.$$

Для того чтобы установить существование предела последовательности $\{x_n\}$, докажем, что эта последовательность *возрастающая* и *ограниченная*. Первое усматривается непосредственно. Докажем, что последовательность $\{x_n\}$ ограничена сверху числом A, где A — наибольшее из двух чисел a и 2. Если $x_n \leqslant a$, то требуемое доказано. Если же $x_n > a$, то, заменив в правой ча-

---

[1]) Ради определенности мы считаем, что $d > c$.

[2]) Рекуррентная формула (от латинского слова «recurrens» — возвращающийся) — формула, позволяющая выразить $(n+1)$-й элемент последовательности через значения ее первых n элементов.

сти неравенства $x_n^2 = a + x_{n-1} \leqslant a + x_n$ число a превосходящим его числом x_n, мы получим $x_n^2 < 2x_n$, откуда $x_n < 2$. Итак, мы доказали, что последовательность $\{x_n\}$ ограничена сверху. По теореме 3.15 она имеет предел. Обозначим этот предел через c. Очевидно, $c > 0$. Из рекуррентной формулы имеем соотношение

$$x_n^2 = a + x_{n-1},$$

которое означает, что последовательности $\{x_n^2\}$ и $\{a + x_{n-1}\}$ тождественны. Поэтому их пределы равны. Так как первая из этих последовательностей имеет предел c^2, а вторая $a + c$, то $c^2 = = a + c$. Отсюда, поскольку $c > 0$, находим, что $c = \dfrac{1 + \sqrt{1 + 4a}}{2}$.

Пример 2. Рассмотрим теперь последовательность $\{x_n\}$, с помощью которой обычно вычисляют квадратный корень из положительного числа a на современных быстродействующих электронных машинах. Эта последовательность определяется следующей рекуррентной формулой:

$$x_{n+1} = \frac{1}{2}\left(x_n + \frac{a}{x_n}\right), \quad n = 1, 2, \ldots,$$

где в качестве x_1 может быть взято любое положительное число.

Докажем, что эта последовательность сходится и имеет своим пределом число $\sqrt{a}$. Прежде всего докажем существование предела последовательности $\{x_n\}$. Для этого достаточно установить, что последовательность $\{x_n\}$ *ограничена снизу и, начиная со второго номера, является не возрастающей.* Сначала докажем, что последовательность $\{x_n\}$ ограничена снизу. По условию $x_1 > 0$. Но тогда из рекуррентной формулы, взятой при $n = 1$, вытекает, что $x_2 > 0$, а отсюда и из той же формулы, взятой при $n = 2$, вытекает, что $x_3 > 0$. Продолжая эти рассуждения, мы докажем, что все $x_n > 0$.

Докажем теперь, что *при $n \geqslant 2$ все x_n удовлетворяют неравенству $x_n \geqslant \sqrt{a}$.* Переписав рекуррентную формулу в виде $x_{n+1} = \dfrac{\sqrt{a}}{2}\left(\dfrac{x_n}{\sqrt{a}} + \dfrac{\sqrt{a}}{x_n}\right)$, воспользуемся почти очевидным неравенством $t + \dfrac{1}{t} \geqslant 2$ [1]), справедливым для любого $t > 0$ $\left(\text{мы берем } t = = \dfrac{x_n}{\sqrt{a}}\right)$. Получим, что $x_{n+1} \geqslant \sqrt{a}$ при любом $n \geqslant 1$, т. е. $x_n \geqslant \sqrt{a}$, начиная с номера $n = 2$.

Докажем, наконец, что *последовательность $\{x_n\}$ при $n \geqslant \geqslant 2$ не возрастает.* Из рекуррентной формулы получим $\dfrac{x_{n+1}}{x_n} =$

---

[1]) Для доказательства этого неравенства достаточно заметить, что при $t > 0$ оно эквивалентно неравенству $t^2 - 2t + 1 \geqslant 0$.

$= \frac{1}{2}\left(1+\frac{a}{x_n^2}\right)$, а отсюда, учитывая, что $x_n \geqslant \sqrt{a}$, найдем $\frac{x_{n+1}}{x_n} \leqslant 1$, или $x_n \geqslant x_{n+1}$ (при $n \geqslant 2$). Так как последовательность $\{x_n\}$ при $n \geqslant 2$ невозрастающая и ограничена снизу числом $\sqrt{a}$, то она имеет предел, не меньший $\sqrt{a}$ (см. теорему 3.15 и теорему 3.13). Обозначая этот предел через c и учитывая, что $\lim\limits_{n\to\infty} x_{n+1} = c$ и $\lim\limits_{n\to\infty} \left\{\frac{1}{2}\left(x_n + \frac{a}{x_n}\right)\right\} = \frac{1}{2}\left(c + \frac{a}{c}\right)$ получим $c = \frac{1}{2}\left(c + \frac{a}{c}\right)$ [1]). Следовательно, $c = \sqrt{a}$.

З а м е ч а н и е 1. В рассмотренных примерах использовался следующий часто употребляемый прием разыскания предела последовательностей. Сначала устанавливается существование предела, а затем находится его числовое значение из уравнения, которое получается из рекуррентной формулы путем замены в ней x_n и x_{n+1} искомым значением c предела последовательности $\{x_n\}$.

З а м е ч а н и е 2. Рекуррентные формулы часто используются в современной вычислительной математике, поскольку их применение приводит к многократному повторению однотипных вычислительных операций, что особенно удобно при проведении вычислений на быстродействующих электронно-вычислительных машинах.

Рассмотренная нами рекуррентная формула определяет, как мы убедились, алгоритм вычисления $\sqrt{a}$ (мы доказали, что $\lim\limits_{n\to\infty} x_n = \sqrt{a}$).

В дополнении 2 к настоящей главе изучается вопрос о скорости сходимости последовательности $\{x_n\}$ к $\sqrt{a}$. Мы доказываем, что для любого $a > 1$ при определенном выборе первого приближения x_1 уже четвертое приближение x_4 дает нам число $\sqrt{a}$ с ошибкой, не превышающей 10^{-10}.

П р и м е р 3. Докажем, что последовательность $\{c_n\}$, для которой $c_n = \frac{x^{n+1}}{(n+1)!}$, имеет при любом фиксированном x предел, равный нулю. Так как при достаточно большом n дробь $\frac{|x|}{n+1} < 1$, то, начиная с некоторого номера N, имеем $|c_{n+1}| < |c_n|$, поскольку $|c_{n+1}| = \frac{|x^n|}{n!} \cdot \frac{|x|}{n+1} = |c_n| \cdot \frac{|x|}{n+1}$.

Следовательно, начиная с номера N, последовательность $\{|c_n|\}$ будет монотонно убывающей и ограниченной снизу (например, нулем). По теореме 3.15 последовательность $\{|c_n|\}$ сходится. Пусть c — предел этой последовательности. Из соотно-

---

[1]) Это равенство вытекает из рекуррентной формулы $x_{n+1} = \frac{1}{2}\left(x_n + \frac{a}{x_n}\right)$.

шения $|c_{n+1}| = |c_n| \cdot \dfrac{|x|}{n+1}$ следует, что $c = 0$, так как предел последовательности $\{|c_{n+1}|\}$ равен c, а предел последовательности $\left\{\dfrac{|x|}{n+1}\right\}$ равен нулю.

4. Число *e*. Применим теорему 3.15 о существовании предела монотонной последовательности для доказательства существования предела последовательности $\{x_n\}$, элемент x_n которой определяется формулой

$$x_n = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n.$$

Докажем, что эта последовательность *возрастает и ограничена сверху*. Применив формулу бинома Ньютона, найдем

$$x_n = 1 + n\frac{1}{n} + \frac{n(n-1)}{2!}\frac{1}{n^2} + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!}\frac{1}{n^3} + \ldots \\ \ldots + \frac{n(n-1)(n-2)\ldots[n-(n-1)]}{n!}\frac{1}{n^n}.$$

Представим это выражение в следующей форме:

$$x_n = 2 + \frac{1}{2!}\left(1 - \frac{1}{n}\right) + \frac{1}{3!}\left(1 - \frac{1}{n}\right)\left(1 - \frac{2}{n}\right) + \ldots \\ \ldots + \frac{1}{n!}\left(1 - \frac{1}{n}\right)\left(1 - \frac{2}{n}\right)\ldots\left(1 - \frac{n-1}{n}\right). \quad (3.6)$$

Совершенно аналогичным образом запишем элемент x_{n+1}:

$$x_{n+1} = 2 + \frac{1}{2!}\left(1 - \frac{1}{n+1}\right) + \frac{1}{3!}\left(1 - \frac{1}{n+1}\right)\left(1 - \frac{2}{n+1}\right) + \ldots \\ \ldots + \frac{1}{(n+1)!}\left(1 - \frac{1}{n+1}\right)\left(1 - \frac{2}{n+1}\right)\ldots\left(1 - \frac{n}{n+1}\right).$$

Непосредственным сравнением убеждаемся, что [1])

$$x_n < x_{n+1},$$

т. е. последовательность $\{x_n\}$ *возрастающая*.

Для доказательства ограниченности этой последовательности сверху заметим, что каждое выражение в круглых скобках в соотношении (3.6) меньше единицы. Учитывая также, что $\dfrac{1}{k!} < \dfrac{1}{2^{k-1}}$ при $k \geqslant 2$, получим

$$x_n < 2 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2^2} + \ldots + \frac{1}{2^{n-1}} = 3 - \frac{1}{2^{n-1}} < 3.$$

Итак, последовательность $\{x_n\}$ возрастает и ограничена сверху. По теореме 3.15 последовательность $\{x_n\}$ имеет предел. Этот

[1]) Ибо $\left(1 - \dfrac{k}{n}\right) < \left(1 - \dfrac{k}{n+1}\right)$ для любого $0 < k < n$ и, кроме того, x_{n+1} содержит по сравнению с x_n лишний положительный член.

предел называют числом e. Следовательно, по определению,

$$e = \lim_{n\to\infty}\left(1+\frac{1}{n}\right)^n.$$

З а м е ч а н и е. В дальнейшем выяснится, что число e играет важную роль в математике. В настоящем пункте мы даем только определение числа e, но не указываем способа вычисления этого числа с любой степенью точности. Это будет сделано в пп. 1 и 2 § 16 гл. 8.

Здесь мы лишь отметим, что поскольку $x_n < 3$ и из (3.6) непосредственно очевидно, что $2 < x_n$, то число e заключено в пределах

$$2 \leqslant e \leqslant 3 \tag{3.7}$$

(в силу следствия 2 из теоремы 3.13).

§ 4. Некоторые свойства произвольных последовательностей и числовых множеств

1. Подпоследовательности числовых последовательностей. Пусть $x_1, x_2, \ldots, x_n, \ldots$ — некоторая числовая последовательность. Рассмотрим произвольную возрастающую последовательность целых положительных чисел $k_1, k_2, \ldots, k_n, \ldots$ Выберем из последовательности $\{x_n\}$ элементы с номерами $k_1, k_2, \ldots, k_n, \ldots$ и расположим их в таком же порядке, как и числа k_n:

$$x_{k_1}, x_{k_2}, \ldots, x_{k_n}, \ldots$$

Полученную числовую последовательность будем называть *подпоследовательностью* последовательности $\{x_n\}$. В частности, сама последовательность $\{x_n\}$ может рассматриваться как подпоследовательность (в этом случае $k_n = n$). Отметим следующее свойство подпоследовательностей сходящейся последовательности: *если последовательность $\{x_n\}$ сходится и имеет своим пределом число a, то и любая подпоследовательность этой последовательности сходится и имеет своим пределом число a.* В самом деле, так как $\{x_n\}$ — сходящаяся последовательность и a — ее предел, то для любого $\varepsilon > 0$ можно указать номер N такой, что при $n \geqslant N$ выполняется неравенство $|x_n - a| < \varepsilon$. Пусть $\{x_{k_n}\}$ — некоторая подпоследовательность последовательности $\{x_n\}$. Так как $k_N \geqslant N$, то, начиная с номера k_N, элементы подпоследовательности $\{x_{k_n}\}$ удовлетворяют неравенству $|x_n - a| < \varepsilon$. Поэтому подпоследовательность $\{x_{k_n}\}$ сходится и имеет пределом число a. Справедливо и обратное предложение: *если все подпоследовательности данной последовательности $\{x_n\}$ сходятся, то пределы всех этих подпоследовательностей равны одному и тому*

же числу a; в частности, к этому же числу сходится и последовательность $\{x_n\}$. Действительно, так как последовательность $\{x_n\}$ также является подпоследовательностью, то она сходится и имеет пределом некоторое число a. Но тогда и любая другая подпоследовательность также сходится и имеет тот же предел a.

Подпоследовательности бесконечно больших последовательностей обладают аналогичным свойством. Именно, *каждая подпоследовательность бесконечно большой последовательности также будет бесконечно большой.* Доказательство этого утверждения аналогично доказательству соответствующего предложения о подпоследовательностях сходящихся последовательностей.

З а м е ч а н и е. Из каждой сходящейся последовательности можно выделить монотонную сходящуюся подпоследовательность. В самом деле, если $\{x_n\}$ — сходящаяся последовательность и a — ее предел, то имеет место по крайней мере один из следующих трех случаев: 1) имеется бесконечно много равных a элементов последовательности, 2) в любой ε-окрестности точки a имеется бесконечно много элементов, удовлетворяющих неравенству $x_n < a$, 3) в любой ε-окрестности точки a имеется бесконечно много элементов, удовлетворяющих неравенству $x_n < a$ [1]). В первом случае сходящейся монотонной подпоследовательностью является подпоследовательность равных a элементов. Второй и третий случаи рассматриваются одинаково, поэтому ограничимся рассмотрением второго случая, т. е. будем считать, что в любой ε-окрестности точки a имеется бесконечно много элементов x_n, удовлетворяющих неравенству $x_n < a$. Иными словами рассмотрим случай, когда в любом интервале $(a - \varepsilon, a)$ содержится бесконечно много элементов последовательности. Пусть x_{k_1} — один из этих элементов, $x_{k_1} < a$. Из бесконечного множества элементов последовательности $\{x_n\}$, находящихся на интервале (x_{k_1}, a), выберем какой-нибудь элемент x_{k_2}, номер k_2 которого больше k_1. Затем из бесконечного множества элементов последовательности $\{x_n\}$, находящихся на интервале (x_{k_2}, a) выберем элемент x_{k_3}, для которого $k_3 > k_2$. Продолжая этот процесс неограниченно, мы получим монотонно возрастающую подпоследовательность $\{x_{k_n}\}$ последовательности $\{x_n\}$, которая, в силу указанного в этом пункте свойства подпоследовательностей сходящейся последовательности, сходится к a.

---

[1]) Если бы ни один из этих случаев не имел места, то в некоторой ε-окрестности точки a находилось бы лишь конечное число элементов последовательности, т. е. точка a не была бы пределом последовательности.

Отметим, что из каждой бесконечно большой последовательности можно выделить монотонную бесконечно большую подпоследовательность.

2. Предельные точки последовательности.

Определение 1. *Точка x бесконечной прямой называется* п р е д е л ь н о й т о ч к о й *последовательности $\{x_n\}$, если в любой ε-окрестности этой точки имеется бесконечно много элементов последовательности $\{x_n\}$.*

Справедлива следующая лемма.

Лемма 2. *Если x — предельная точка последовательности $\{x_n\}$, то из этой последовательности можно выделить подпоследовательность $\{x_{k_n}\}$, сходящуюся к числу x.*

Д о к а з а т е л ь с т в о. Пусть x — предельная точка последовательности $\{x_n\}$. Рассмотрим систему ε-окрестностей точки x, для которых ε последовательно равно $1, 1/2, 1/3, \ldots, 1/n, \ldots$ В первой из этих окрестностей выберем элемент x_{k_1} последовательности $\{x_n\}$, во второй окрестности выберем элемент x_{k_2} такой, что $k_2 > k_1$. В третьей окрестности выберем элемент x_{k_3} такой, что $k_3 > k_2$. Этот процесс можно продолжать неограниченно, так как в любой ε-окрестности точки x имеется бесконечно много элементов последовательности $\{x_n\}$. В результате мы получим подпоследовательность $x_{k_1}, x_{k_2}, \ldots, x_{k_n}, \ldots$ последовательности $\{x_n\}$, которая сходится к x, так как $|x_{k_n} - x| < \dfrac{1}{n}$. Лемма доказана.

З а м е ч а н и е. Справедливо и обратное утверждение: если из последовательности $\{x_n\}$ можно выделить подпоследовательность, сходящуюся к числу x, то число x является предельной точкой последовательности $\{x_n\}$. В самом деле, в любой ε-окрестности точки x имеется бесконечно много элементов выделенной подпоследовательности, а стало быть, и самой последовательности $\{x_n\}$.

Таким образом, можно дать другое определение предельной точки последовательности, эквивалентное определению 1.

Определение 2. *Точка x называется предельной точкой последовательности $\{x_n\}$, если из этой последовательности можно выделить подпоследовательность, сходящуюся к x.*

Отметим следующее утверждение.

Лемма 3. *Каждая сходящаяся последовательность имеет только одну предельную точку, совпадающую с пределом этой последовательности.*

Д о к а з а т е л ь с т в о. Отметим, во-первых, что предел a сходящейся последовательности $\{x_n\}$ является предельной точкой этой последовательности, поскольку в любой ε-окрестности точки a содержатся все элементы последовательности, начиная с некоторого номера. Убедимся, что у сходящейся последова-

тельности нет других предельных точек. Действительно, пусть b — предельная точка сходящейся последовательности. В силу леммы 2 из $\{x_n\}$ можно выделить подпоследовательность $\{x_{k_n}\}$, сходящуюся к b, но любая подпоследовательность сходящейся последовательности имеет предел a (см. п. 1 этого параграфа), и поэтому $b = a$.

Приведем пример последовательности, имеющей две предельные точки. Докажем, что последовательность

$$1, 2, \frac{1}{2}, 2, \frac{1}{3}, 2, \ldots, \frac{1}{n}, 2, \ldots$$

имеет только две предельные точки 0 и 2. Очевидно, что эти точки являются предельными точками рассматриваемой последовательности, поскольку подпоследовательность $1, 1/2, 1/3, \ldots$ $\ldots, 1/n, \ldots$ этой последовательности имеет предел нуль, а подпоследовательность $2, 2, \ldots, 2, \ldots$ имеет предел 2 [1]. Других предельных точек у этой последовательности нет. В самом деле, пусть x — любая точка числовой оси, отличная от точек 0 и 2. Рассмотрим неперекрывающиеся ε-окрестности точек 0, 2 и x (рис. 3.1). В ε-окрестностях точек 0 и 2 содержатся, начиная с некоторого номера, все элементы последовательности, и поэтому в указанной ε-окрестности точки x находится лишь конечное число ее элементов, т. е. x не является предельной точкой.

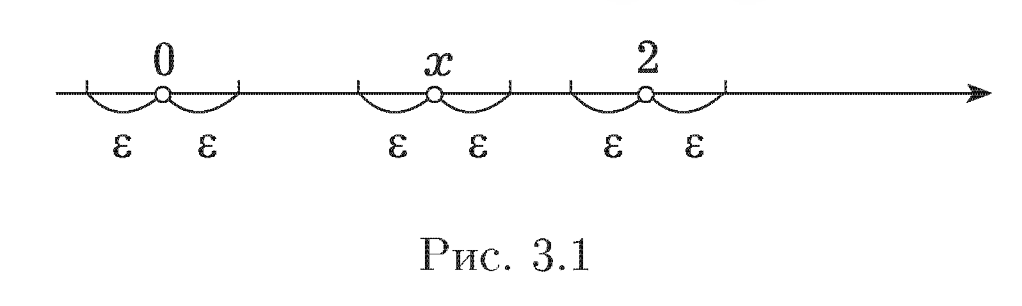


Рис. 3.1

3. Существование предельной точки у ограниченной последовательности. Справедливо следующее замечательное утверждение.

Теорема 3.16. *У всякой ограниченной последовательности существует хотя бы одна предельная точка.*

Доказательство. Так как последовательность $\{x_n\}$ ограничена, то существуют вещественные числа m и M такие, что все элементы x_n последовательности $\{x_n\}$ удовлетворяют неравенствам $m \leqslant x_n \leqslant M$. *Рассмотрим множество* $\{x\}$ *вещественных чисел* x *таких, что правее* [2] *каждого из этих чисел либо вовсе нет элементов последовательности* $\{x_n\}$, *либо таких элементов лишь конечное число.* Множество $\{x\}$ имеет хотя бы один элемент (например, число M) и ограничено снизу (любым числом, меньшим m). В силу теоремы 2.1 у множе-

[1]) См. определение 2 предельной точки.

[2]) Мы говорим, что число a лежит правее числа b, если $a > b$ (см. § 3 гл. 2).

ства $\{x\}$ существует *точная нижняя грань*, которую мы обозначим через $\overline{x}$ [1]).

Докажем, что это число $\overline{x}$ и является предельной точкой последовательности $\{x_n\}$. Пусть ε — любое положительное число. Число $\overline{x} - \varepsilon$ заведомо не принадлежит множеству $\{x\}$, а поэтому *правее числа $\overline{x} - \varepsilon$ лежит бесконечно много элементов последовательности* $\{x_n\}$. По определению точной нижней грани найдется число x' из множества $\{x\}$, удовлетворяющее неравенствам $\overline{x} \leqslant x' \leqslant \overline{x} + \varepsilon$ (рис. 3.2). По определению множества $\{x\}$ *правее x' лежит не более чем конечное число элементов последовательности* $\{x_n\}$. Стало быть, на полусегменте $(\overline{x} - \varepsilon, x']$, а тем более и в ε-окрестности точки $\overline{x}$ содержится бесконечно много элементов последовательности, т. е. $\overline{x}$ является предельной точкой последовательности $\{x_n\}$. Теорема доказана.

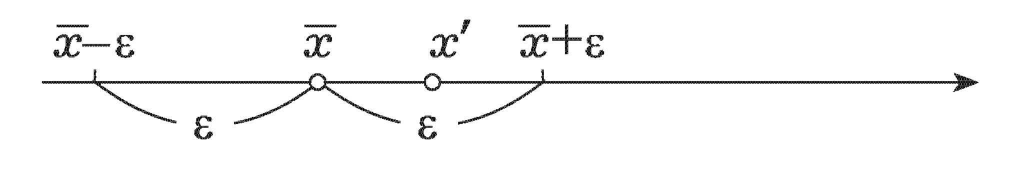


Рис. 3.2

Замечание 1. Обратимся еще раз к множеству $\{x\}$, введенному при доказательстве теоремы 3.16. Мы доказали, что точная нижняя грань $\overline{x}$ этого множества представляет собой предельную точку последовательности $\{x_n\}$. Докажем, что *ни одно число x, превосходящее $\overline{x}$, не является предельной точкой последовательности* $\{x_n\}$, т. е. $\overline{x}$ является наибольшей предельной точкой этой последовательности. Пусть x — любое число, превосходящее $\overline{x}$. Выберем $\varepsilon > 0$ столь малым, чтобы число $x - \varepsilon$ также превосходило число $\overline{x}$ (рис. 3.3). По определению точной нижней грани найдется число x' из множества $\{x\}$, лежащее левее $x - \varepsilon$. По определению множества $\{x\}$, правее x', а стало быть, и в ε-окрестности точки x лежит не более чем конечное число элементов последовательности $\{x_n\}$. Это и доказывает, что число x не является предельной точкой.

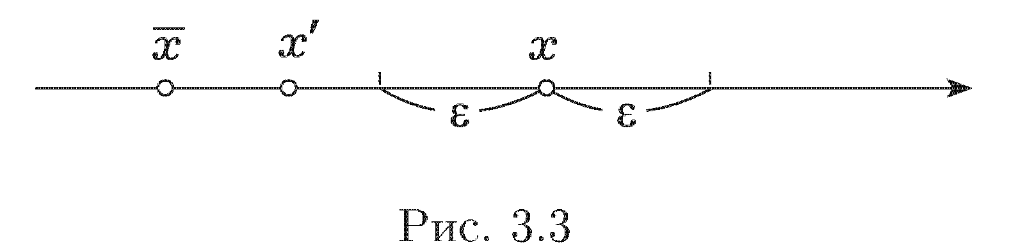


Рис. 3.3

Определение. *Наибольшая предельная точка $\overline{x}$ последовательности $\{x_n\}$ называется верхним пределом этой последовательности и обозначается символом* $\overline{x} = \overline{\lim\limits_{n\to\infty}} x_n$.

Замечание 1 позволяет утверждать, что *у всякой ограниченной последовательности существует верхний предел.*

[1]) Целесообразность обозначения этой нижней грани символом $\overline{x}$ будет выяснена ниже.

Совершенно аналогично вводится понятие *нижнего предела* x последовательности $\{x_n\}$, который определяется как наименьшая предельная точка этой последовательности. Для нижнего предела используется обозначение $\underline{x} = \varliminf\limits_{n\to\infty} x_n$.

Существование нижнего предела у любой ограниченной последовательности $\{x_n\}$ доказывается в полной аналогии с рассуждениями теоремы 3.16 и замечания 1 к этой теореме. Только на этот раз следует рассмотреть множество $\{x\}$ вещественных чисел x таких, что *левее* каждого из этих чисел лежит не более чем конечное число элементов этой последовательности.

Итак, мы приходим к следующему утверждению.

У всякой ограниченной последовательности существуют верхний и нижний пределы.

Извлечем еще ряд следствий из рассуждений теоремы 3.16 и замечания 1.

Следствие 1. *Если (a, b) — интервал, вне которого лежит лишь конечное число элементов ограниченной последовательности $\{x_n\}$, а $\underline{x}$ и $\overline{x}$ — нижний и верхний пределы этой последовательности, то интервал $(\underline{x}, \overline{x})$ содержится в интервале (a, b) и поэтому $\overline{x} - \underline{x} \leqslant b - a$.*

Доказательство. Так как правее точки b находится не более чем конечное число элементов последовательности , то b принадлежит указанному в доказательстве теоремы 3.16 множеству $\{x\}$ и поэтому $\overline{x} \leqslant b$. Рассуждая аналогично, убедимся, что $a \leqslant \underline{x}$. Это и означает, что интервал (a, b) содержит интервал $(\underline{x}, \overline{x})$.

Следствие 2. *Для любого положительного числа ε интервал $(\underline{x} - \varepsilon, \overline{x} + \varepsilon)$ содержит все элементы последовательности $\{x_n\}$, начиная с некоторого номера (зависящего, конечно, от ε).*

Доказательство. Так как $\overline{x}$ является точной нижней гранью множества $\{x_n\}$, указанного при доказательстве теоремы 3.16, то для любого $\varepsilon > 0$ найдется число x', меньшее $\overline{x} + \varepsilon$ и принадлежащее $\{x\}$. Но это означает, что направо от x', а стало быть, и *направо от интервала $(\underline{x} - \varepsilon, \overline{x} + \varepsilon)$ может лежать лишь конечное число элементов последовательности* $\{x_n\}$. Аналогично доказывается, что и налево от интервала $(\underline{x} - \varepsilon, \overline{x} + \varepsilon)$ может лежать лишь конечное число элементов последовательности $\{x_n\}$.

Замечание 2. Выясним вопрос о том, сколько предельных точек может иметь ограниченная последовательность $\{x_n\}$.

Обозначим через $\underline{x}$ и $\overline{x}$ соответственно нижний и верхний пределы этой последовательности. Очевидно, что все предельные точки последовательности $\{x_n\}$ (сколько бы их ни было) лежат на сегменте $[\underline{x}, \overline{x}]$.

Если $\underline{x} = \overline{x}$ [1]), то последовательность имеет только одну предельную точку. Если же $\underline{x} < \overline{x}$, то последовательность имеет по крайней мере две предельные точки $\underline{x}$ и $\overline{x}$. Отметим, что последовательность может иметь любое и даже бесконечное число предельных точек. Последовательность 1, 2, 1/2, 2, ... , $1/n$, 2, ... , рассмотренная в предыдущем пункте, имеет только две предельные точки: нижний предел $\underline{x} = 0$ и верхний предел $\overline{x} = 2$. Приведем пример последовательности, имеющей бесконечно много предельных точек. Рассмотрим, например, последовательность, элементы которой без повторений пробегают все рациональные числа сегмента $[0, 1]$ [2]). Очевидно, любая точка этого сегмента будет предельной точкой указанной последовательности.

4. О выделении сходящейся подпоследовательности. Результаты предыдущего пункта приводят к следующей *основной* теореме.

Теорема 3.17 (теорема Больцано–Вейерштрасса [3])). *Из любой ограниченной последовательности можно выделить сходящуюся подпоследовательность.*

Доказательство. Так как последовательность ограничена, то она имеет хотя бы одну предельную точку x. В таком случае из этой последовательности можно выделить подпоследовательность, сходящуюся к точке x (см. определение 2 предельной точки).

Замечание 1. *Из любой ограниченной последовательности можно выделить монотонную подпоследовательность.* В самом деле, в силу теоремы Больцано–Вейерштрасса из любой ограниченной последовательности можно выделить сходящуюся подпоследовательность, а из этой подпоследовательности, в силу замечания п. 1 этого параграфа, можно выделить монотонную подпоследовательность.

---

[1]) Ниже мы докажем, что равенство $\underline{x} = \overline{x}$ и условие ограниченности являются необходимыми и достаточными условиями сходимости последовательности.

[2]) Рациональные числа сегмента $[0, 1]$ можно расположить в последовательность без повторений, например, так. Рассмотрим группы рациональных чисел этого сегмента, причем в первую группу отнесем числа 0 и 1, во вторую — число 1/2, в третью — все несократимые числа p/q со знаменателем 3 и вообще в n-ю группу — все несократимые рациональные дроби из сегмента $[0, 1]$ со знаменателем n. Очевидно, каждое рациональное число попадает в одну группу и в каждой группе будет лишь конечное количество рациональных чисел. Выпишем теперь подряд элементы первой группы, за ними элементы второй группы, затем третьей и т. д. В результате мы и получим нужную нам последовательность.

[3]) Бернгард Больцано — чешский философ и математик (1781–1848), Карл Вейерштрасс — немецкий математик (1815–1897).

З а м е ч а н и е 2. *Пусть* $\{x_n\}$ — *ограниченная последовательность, элементы которой находятся на сегменте* $[a, b]$. *Тогда предел с любой сходящейся подпоследовательности* $\{x_{k_n}\}$ *также находится на сегменте* $[a, b]$. Действительно, так как $a \leqslant x_{k_n} \leqslant b$, то в силу следствия 2 из теоремы 3.13 выполняются неравенства $a \leqslant c \leqslant b$. Это и означает, что c находится на сегменте $[a, b]$.

Отметим, что в отдельных случаях и из неограниченной последовательности также можно выделить сходящуюся подпоследовательность. Например, последовательность 1, 1/2, 2, 1/3, ... , n, $1/(n+1)$, ... неограниченная, однако подпоследовательность $1/2, 1/3, \ldots, 1/n, \ldots$ ее элементов с четными номерами сходится. Но не из каждой неограниченной последовательности можно выделить сходящуюся подпоследовательность. Например, любая подпоследовательность неограниченной последовательности 1, 2, ... , n, ... расходится. Поэтому теорему Больцано–Вейерштрасса, вообще говоря, нельзя распространить на неограниченные последовательности.

Аналогом этой теоремы для неограниченных последовательностей является следующее предложение.

Лемма 4. *Из каждой неограниченной последовательности можно выделить бесконечно большую подпоследовательность.*

Д о к а з а т е л ь с т в о. Пусть $\{x_n\}$ — неограниченная последовательность. Тогда найдется элемент x_{k_1} этой последовательности, удовлетворяющий условию $|x_{k_1}| > 1$, элемент x_{k_2} этой последовательности, удовлетворяющий условиям $|x_{k_2}| > 2$, $k_2 > k_1$, ... , элемент x_{k_n} этой последовательности, удовлетворяющий условиям $|x_{k_n}| > n$, $k_n > k_{n-1}$ и т. д. Очевидно, подпоследовательность $x_{k_1}, x_{k_2}, \ldots, x_{k_n}, \ldots$ является бесконечно большой.

Из леммы 4 и из теоремы Больцано–Вейерштрасса вытекает следующее утверждение.

Лемма 5. *Из совершенно произвольной последовательности можно выделить либо сходящуюся, либо бесконечно большую подпоследовательность.*

З а м е ч а н и е 3. Результаты настоящего пункта позволяют несколько расширить понятие предельной точки и верхнего и нижнего пределов последовательности.

Будем говорить, что $+\infty(-\infty)$ является предельной точкой последовательности $\{x_n\}$, если из этой последовательности можно выделить бесконечно большую подпоследовательность, состоящую из положительных (отрицательных) элементов.

При таком расширении понятия предельной точки у последовательности, кроме конечных предельных точек, могут существовать еще две предельные точки $+\infty$ и $-\infty$. В таком случае лемма 5 позволяет утверждать, что *у совершенно произвольной последовательности существует хотя бы одна предельная точка*[1]).

---

[1]) Либо конечная, либо бесконечная.

Естественно считая, что $+\infty$ и $-\infty$ связаны с любым конечным вещественным числом x соотношением $-\infty < x < +\infty$, убедимся в том, что *у совершенно произвольной последовательности существуют верхний и нижний пределы* (т. е. существуют наибольшая и наименьшая предельная точки).

Ради определенности, установим существование верхнего предела.

В силу замечания 1 к теореме 3.16 достаточно рассмотреть только случай, когда последовательность $\{x_n\}$ не является ограниченной. Если при этом $\{x_n\}$ не является ограниченной сверху, то из нее можно выделить бесконечно большую последовательность, все элементы которой положительны, и поэтому $+\infty$ является предельной точкой, а, стало быть, и верхним пределом $\{x_n\}$.

Рассмотрим случай, когда неограниченная последовательность $\{x_n\}$ является ограниченной сверху, т. е. когда существует вещественное число M такое, что все элементы x_n удовлетворяют условию $x_n \leqslant M$. Поскольку последовательность $\{x_n\}$ не является ограниченной снизу, из нее можно выделить бесконечно большую последовательность, все элементы которой отрицательны, а это означает, что $-\infty$ является предельной точкой рассматриваемой последовательности.

Если при этом последовательность не имеет ни одной конечной предельной точки, то $-\infty$ является единственной предельной точкой, а поэтому является и верхним пределом рассматриваемой последовательности. Докажем, что если последовательность, кроме $-\infty$, имеет еще хотя бы одну конечную предельную точку x_0, то и в этом случае у нее существует верхний предел. Так как все элементы x_n удовлетворяют условию $x_n \leqslant M$, то в силу теоремы 3.13 и x_0 удовлетворяет условию $x_0 \leqslant M$. Фиксируем произвольное $\varepsilon > 0$. Так как в ε-окрестности x_0 лежит бесконечно много элементов последовательности $\{x_n\}$, то и на сегменте $[x_0 - \varepsilon, M]$ лежит бесконечно много этих элементов.

Выделим из последовательности $\{x_n\}$ подпоследовательность тех ее элементов, которые лежат на сегменте $[x_0 - \varepsilon, M]$. Выделенная подпоследовательность является ограниченной. Поэтому в силу замечания 1 к теореме 3.16 у нее существует верхний предел, т. е. наибольшая предельная точка $\overline{x}$. Очевидно, что $\overline{x} \geqslant x_0$ и является предельной точкой и всей последовательности $\{x_n\}$. Очевидно также, что последовательность $\{x_n\}$ не имеет предельных точек, превосходящих $\overline{x}$, ибо если бы некоторое число $\overline{\overline{x}}$, превосходящее $\overline{x}$, являлось предельной точкой последовательности $\{x_n\}$, то поскольку все элементы последовательности $\{x_n\}$, превосходящие число $x_0 - \varepsilon$, являются элементами и выделенной нами подпоследовательности, это число $\overline{\overline{x}}$ являлось бы предельной точкой и выделенной нами подпоследовательности, а эта подпоследовательность не имеет предельных точек, превосходящих $\overline{x}$.

Итак, число $\overline{x}$ является наибольшей предельной точкой рассматриваемой последовательности.

Существование у совершенно произвольной последовательности верхнего предела доказано.

Аналогично доказывается существование нижнего предела.

5. Необходимое и достаточное условие сходимости последовательности. При выяснении вопроса о сходимости последовательности $\{x_n\}$ при помощи определения сходимости нам приходится оценивать разность элементов x_n этой последо-

вательности и ее предполагаемого предела a. Иными словами, приходится предугадывать, чему равен предел a этой последовательности.

Естественно указать «внутренний» критерий сходимости последовательности, позволяющий выяснить вопрос о ее сходимости лишь по величине ее элементов. Такой внутренний критерий и будет установлен в настоящем пункте. Для формулировки этого критерия введем понятие фундаментальной последовательности.

Определение. *Последовательность $\{x_n\}$ называется фундаментальной, если для любого положительного ε найдется номер N такой, что для всех номеров n, удовлетворяющих условию $n \geqslant N$, и для всех натуральных чисел p ($p = 1, 2, \ldots$) справедливо неравенство*

$$|x_{n+p} - x_n| < \varepsilon.$$

Основной задачей настоящего пункта является доказательство следующего критерия сходимости последовательности (так называемого критерия Коши[1]): *для того чтобы последовательность была сходящейся, необходимо и достаточно, чтобы она была фундаментальной.*

Прежде чем перейти к доказательству критерия Коши, мы докажем несколько вспомогательных предложений, имеющих и самостоятельный интерес.

Теорема 3.18. *Для того чтобы последовательность $\{x_n\}$ была сходящейся, необходимо и достаточно, чтобы она была ограниченной и чтобы ее верхний и нижний пределы $\overline{x}$ и $\underline{x}$ совпадали.*

Доказательство. 1) Необходимость. Пусть последовательность $\{x_n\}$ сходится. Тогда она *ограничена* (в силу теоремы 3.8) и имеет единственную предельную точку (в силу леммы 3 п. 2). Таким образом, $\underline{x} = \overline{x}$.

2) Достаточность. Следствие 2 из теоремы 3.16 утверждает, что для любого $\varepsilon > 0$ интервал $(\underline{x} - \varepsilon, \overline{x} + \varepsilon)$ содержит все элементы последовательности $\{x_n\}$, начиная с некоторого номера. Так как $\underline{x} = \overline{x} = x$, то указанный интервал совпадает с ε-окрестностью точки x, т. е. число x является пределом последовательности $\{x_n\}$ (см. замечание 1 п. 1 § 2).

Установим теперь важное свойство фундаментальной последовательности, непосредственно вытекающее из ее определения.

Для любого положительного числа ε можно указать такой элемент x_N фундаментальной последовательности, в ε-окрестности которого находятся все элементы последова-

[1]) Огюстен Луи Коши — французский математик (1789–1857).

тельности, начиная с номера N. Иными словами, вне интервала $(x_N - \varepsilon,\ x_N + \varepsilon)$ находится не более чем конечное число элементов последовательности[1]).

В самом деле, из определения фундаментальной последовательности следует: для любого $\varepsilon > 0$ можно указать такой номер N, что для всех натуральных p $(p = 1, 2, 3, \ldots)$ выполняется неравенство $|x_{N+p} - x_N| < \varepsilon$, которое и означает, что в ε-окрестности элемента x_N находятся все элементы последовательности, начиная с номера N.

Отмеченное свойство позволяет установить ограниченность фундаментальной последовательности. В самом деле, пусть ε — некоторое фиксированное положительное число и x_N — элемент, в ε-окрестности которого находятся все элементы последовательности, начиная с номера N. Тогда вне этой ε-окрестности могут находиться только элементы $x_1, x_2, \ldots, x_{N-1}$. Положим $A = \max\{|x_1|, |x_2|, \ldots, |x_{N-1}|,\ |x_N - \varepsilon|, |x_N + \varepsilon|\}$[2]). Тогда на сегменте $[-A, +A]$ находятся числа $x_1,\ x_2,\ \ldots,\ x_{N-1},\ x_N - \varepsilon$, $x_N + \varepsilon$, а следовательно, и все точки ε-окрестности элемента x_N. Отсюда вытекает, что все элементы фундаментальной последовательности находятся на сегменте $[-A, +A]$, что и означает ее ограниченность.

Переходим к доказательству основного утверждения этого пункта.

Теорема 3.19 (критерий Коши сходимости последовательности). *Для того чтобы последовательность $\{x_n\}$ была сходящейся, необходимо и достаточно, чтобы она была фундаментальной.*

Доказательство. 1) Необходимость. Пусть последовательность $\{x_n\}$ сходится и x — ее предел. Требуется доказать, что эта последовательность является фундаментальной. Возьмем *любое* положительное число ε. Из определения сходящейся последовательности вытекает, что для положительного числа $\varepsilon/2$ найдется номер N такой, что при $n \geqslant N$ выполняется неравенство $|x_n - x| < \varepsilon/2$.

Если p — любое натуральное число, то при $n \geqslant N$ выполняется также и неравенство $|x_{n+p} - x| < \varepsilon/2$.

Так как модуль суммы двух величин не больше суммы их модулей, то из последних двух неравенств получим, что при $n \geqslant N$ и для всех натуральных чисел p

$$|x_{n+p} - x_n| = |(x_{n+p} - x) + (x - x_n)| \leqslant |x_{n+p} - x| + |x_n - x| < \varepsilon.$$

---

[1]) Отметим, что указанное свойство эквивалентно определению фундаментальной последовательности.

[2]) Геометрически это означает, что A равно максимальному из расстояний от начала отсчета 0 до точек $x_1, x_2, \ldots, x_{N-1}, x_N - \varepsilon, x_N + \varepsilon$.

Тем самым фундаментальность последовательности $\{x_n\}$ установлена.

2) Д о с т а т о ч н о с т ь. Пусть $\{x_n\}$ — фундаментальная последовательность. Требуется доказать, что эта последовательность сходится. Согласно теореме 3.18 для этого достаточно доказать ограниченность последовательности $\{x_n\}$ и равенство ее верхнего и нижнего пределов $\overline{x}$ и $\underline{x}$. Ограниченность фундаментальной последовательности уже установлена нами выше.

Для доказательства равенства верхнего и нижнего пределов $\overline{x}$ и $\underline{x}$ воспользуемся доказанным выше свойством фундаментальной последовательности: для любого положительного числа ε можно указать элемент x_N такой, что вне интервала $(x_N - \varepsilon, x_N + \varepsilon)$ находится не более чем конечное число элементов последовательности. На основании следствия 1 из теоремы 3.16 интервал $(x_N - \varepsilon, x_N + \varepsilon)$ содержит интервал $(\underline{x}, \overline{x})$, и поэтому $\overline{x} - \underline{x} \leqslant 2\varepsilon$, откуда, в силу произвольности ε, $\underline{x} = \overline{x}$. Тем самым сходимость последовательности установлена. Теорема полностью доказана.

П р и м е р. Применим критерий Коши для установления сходимости следующей последовательности $\{x_n\}$:

$$x_n = a_1 + a_2 + \ldots + a_n,$$

где a_k $(k = 1, 2, 3, \ldots)$ — произвольные вещественные числа, удовлетворяющие условию $|a_k| \leqslant q^k$, а q — некоторое число из интервала $0 < q < 1$.

Пусть n — любой номер, p — любое натуральное число. Тогда, очевидно,

$$|x_{n+p} - x_n| = |a_{n+1} + a_{n+2} + \ldots + a_{n+p}| \leqslant |a_{n+1}| + |a_{n+2}| + \ldots$$
$$\ldots + |a_{n+p}| \leqslant q^{n+1} + q^{n+2} + \ldots + q^{n+p} = \frac{q^{n+1} - q^{n+1+p}}{1-q} < \frac{q^{n+1}}{1-q}.$$

Учитывая, что последовательность $\{q^n\}$ является бесконечно малой (см. пример 1 из п. 3 § 1), мы можем утверждать, что *для любого* $\varepsilon > 0$ найдется номер N такой, что

$$q^{n+1} < \varepsilon(1-q) \qquad (\text{при } n \geqslant N).$$

Стало быть, при $n \geqslant N$ и для любого натурального p

$$|x_{n+p} - x_n| < \frac{q^{n+1}}{1-q} < \varepsilon,$$

т. е. последовательность $\{x_n\}$ является *фундаментальной* и сходится согласно теореме 3.19.

6. Некоторые свойства произвольных числовых множеств. В этом пункте мы рассмотрим некоторые свойства *произвольных числовых множеств*. Часть из этих свойств аналогична свойствам числовых последовательностей.

В п. 5 § 1 гл. 2 мы ввели понятие *множества, ограниченного сверху* (*снизу*). Договоримся теперь называть множество $\{x\}$ *ограниченным с обеих сторон* или просто *ограниченным*, если это множество ограничено и сверху и снизу, т. е. если найдутся такие два вещественных числа m и M, что каждый элемент x множества $\{x\}$ удовлетворяет неравенствам $n \leqslant x \leqslant M$. Множество $\{x\}$ будем называть *конечным* или *бесконечным* в зависимости от того, является ли число элементов, входящих в состав этого множества, конечным или бесконечным.

Точку x бесконечной прямой назовем предельной точкой множества $\{x\}$, если в любой ε-окрестности точки x содержится бесконечно много элементов этого множества.

Точку $\overline{x}$ (точку $\underline{x}$) назовем *верхней* (*нижней*) *предельной точкой* множества $\{x\}$, если эта точка является предельной точкой множества $\{x\}$, но ни одна точка, бо́льшая $\overline{x}$ (меньшая $\underline{x}$), не является предельной точкой этого множества.

Дословно повторяя доказательство теоремы 3.16 с заменой термина «последовательность $\{x_n\}$» на «множество $\{x\}$», мы придем к следующему утверждению: *у всякого ограниченного бесконечного множества существует хотя бы одна предельная точка.*

Дословно повторяя рассуждения замечания 1 к теореме 3.16, мы получим, что *всякое ограниченное бесконечное множество имеет верхнюю и нижнюю предельные точки.* Следствием указанных утверждений является следующий факт: *из элементов всякого ограниченного бесконечного множества можно выделить сходящуюся последовательность.*

Наряду с понятием множества часто пользуются понятием *подмножества*. Множество $\{x'\}$ называется *подмножеством множества* $\{x\}$, если все элементы множества $\{x'\}$ входят в состав множества $\{x\}$. Например, множество всех четных целых чисел является подмножеством множества всех целых чисел.

Два множества $\{x\}$ и $\{y\}$ называют *эквивалентными*, если между элементами этих множеств можно установить взаимно однозначное соответствие [1]). Заметим, что два конечных множества эквивалентны тогда и только тогда, когда число элементов у этих множеств одинаковое. Приведем пример двух эквивалентных бесконечных множеств. Легко видеть, что множество $\{x\}$, элементами которого служат четные положительные числа 2, 4, 6, ..., $2n$, ..., эквивалентно множеству $\{y\}$, элементами которого служат натуральные числа 1, 2, 3, ..., n, ... В самом деле, мы установим взаимно однозначное соответствие между элементами этих множеств, поставив в соответствие элементу $2n$ множества $\{x\}$ элемент n множества $\{y\}$. Обратим внимание на то, что рассмотренное нами множество $\{x\}$ является подмножеством множества $\{y\}$. Таким образом, бесконечное множество $\{y\}$ оказывается эквивалентным своему подмножеству $\{x\}$ [2]).

---

1) *Взаимно однозначным соответствием* между элементами двух множеств называется такое соответствие, при котором каждому элементу первого множества отвечает только один элемент второго множества так, что при этом каждый элемент второго множества отвечает только одному элементу первого множества.

2) Легко показать, что любое бесконечное множество эквивалентно некоторому своему подмножеству, не совпадающему со всем множеством. Этот факт может быть принят за определение бесконечного множества.

Из всевозможных множеств выделим следующие два важных типа:

1°. *Всякое множество, эквивалентное множеству всех натуральных чисел* 1, 2, 3, ... , n, ... *будем называть счетным.* Из определения счетного множества вытекает, что все элементы этого множества можно занумеровать.

2°. *Всякое множество, эквивалентное множеству всех вещественных чисел интервала* $(0, 1)$, *будем называть множеством мощности континуума.*

Приведем примеры счетных множеств и множеств мощности континуума. Первым примером счетного множества может служить рассмотренное выше множество четных положительных чисел 2, 4, 6, ... , $2n$, ... Другим примером счетного множества может служить множество всех рациональных чисел сегмента $[0, 1]$, ибо, как доказано в сноске [2]) на с. 85, это множество можно расположить в последовательность без повторений, т. е. занумеровать. Примером множества мощности континуума может служить множество всех вещественных чисел (бесконечная прямая). В самом деле, функция $y = \operatorname{ctg} \pi x$ [1]) устанавливает взаимно однозначное соответствие между точками интервала $0 < x < 1$ и точками бесконечной прямой.

В заключение докажем, *что множество мощности континуума не эквивалентно счетному множеству.* Для этого достаточно доказать, что множество всех вещественных чисел интервала $(0, 1)$ нельзя занумеровать. Допустим противное, т. е. предположим, что все вещественные числа интервала $(0, 1)$ можно занумеровать. Тогда, записывая эти числа в виде бесконечных десятичных дробей, мы получим последовательность

$$\begin{aligned}
x_1 &= 0,\ \ a_{11}a_{12}\ldots a_{1n}\ldots \\
x_2 &= 0,\ \ a_{21}a_{22}\ldots a_{2n}\ldots \\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
x_n &= 0,\ \ a_{n1}a_{n2}\ldots a_{nn}\ldots \\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots
\end{aligned}$$

Рассмотрим теперь вещественное число $x = 0,\ b_1,\ b_2\ \ldots\ b_n\ \ldots$, где b_1 — любая цифра, отличная от a_{11}, 0 и 9, b_2 — любая цифра, отличная от a_{22}, 0 и 9, и вообще b_n — любая цифра, отличная от a_{nn}, 0 и 9.

Так как число x не содержит после запятой нулей и девяток, то это число не принадлежит к классу рациональных чисел, представимых двумя способами в виде бесконечных десятичных дробей [2]). Но в таком случае число x заведомо отлично от *всех* чисел $x_1, x_2, \ldots, x_n, \ldots$, ибо совпадение числа x с каким-либо x_n означало бы совпадение b_n и a_{nn}.

Математиков долгое время занимал вопрос о существовании бесконечного множества $\{x\}$, не эквивалентного ни счетному множеству, ни множеству мощности континуума, но эквивалентного части множества мощности континуума. В 1963 г. американский математик П. Коэн доказал, что гипотеза о существовании такого множества не зависит от остальных аксиом теории множеств. Это означает, что возможно построить внутренне не про-

---

[1]) Читатель имеет представление о функции $y = \operatorname{ctg} \pi x$ из элементарного курса. Вопрос о строгом построении тригонометрических функций выясняется в гл. 4.

[2]) См. п. 3 § 1 гл. 2.

тиворечивую теорию множеств, постулирующую как факт существования такого множества, так и факт его отсутствия (см. книгу: П. Дж. Коэн. Теория множеств и континуум-гипотеза. — М.: Мир, 1969).

ДОПОЛНЕНИЕ 1

ТЕОРЕМА ШТОЛЬЦА

Во многих случаях для исследования сходимости частного $\left\{\frac{x_n}{y_n}\right\}$ последовательностей $\{x_n\}$ и $\{y_n\}$ оказывается полезным следующее предложение.

Теорема Штольца. *Пусть $\{y_n\}$ — возрастающая бесконечно большая последовательность, и пусть последовательность $\left\{\frac{x_n - x_{n-1}}{y_n - y_{n-1}}\right\}$ сходится и имеет предел a. Тогда последовательность $\left\{\frac{x_n}{y_n}\right\}$ сходится и имеет предел a. Таким образом,*

$$\lim_{x\to\infty} \frac{x_n}{y_n} = \lim_{x\to\infty} \frac{x_n - x_{n-1}}{y_n - y_{n-1}}.$$

Доказательство. Поскольку последовательность $\left\{\frac{x_n - x_{n-1}}{y_n - y_{n-1}}\right\}$ сходится и имеет пределом число a, то последовательность $\{\alpha_n\}$, где $\alpha_n = \frac{x_n - x_{n-1}}{y_n - y_{n-1}} - a$, бесконечно малая. Пусть $\overline{N}$ — любой фиксированный номер и $n > \overline{N}$. Используя выражение для α_n, рассмотрим серию равенств:

$$\begin{gathered}
x_{\overline{N}+1} - x_{\overline{N}} = a\big(y_{\overline{N}+1} - y_{\overline{N}}\big) + \alpha_{\overline{N}+1}\big(y_{\overline{N}+1} - y_{\overline{N}}\big), \\
x_{\overline{N}+2} - x_{\overline{N}+1} = a\big(y_{\overline{N}+2} - y_{\overline{N}+1}\big) + \alpha_{\overline{N}+2}\big(y_{\overline{N}+2} - y_{\overline{N}+1}\big), \\
\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\
x_{n-1} - x_{n-2} = a(y_{n-1} - y_{n-2}) + \alpha_{n-1}(y_{n-1} - y_{n-2}), \\
x_n - x_{n-1} = a(y_n - y_{n-1}) + \alpha_n(y_n - y_{n-1}).
\end{gathered}$$

Складывая эти равенства, найдем

$$x_n - x_{\overline{N}} = ay_n - ay_{\overline{N}} + \alpha_{\overline{N}+1}\big(y_{\overline{N}+1} - y_{\overline{N}}\big) + \alpha_{\overline{N}+2}\big(y_{\overline{N}+2} - y_{\overline{N}+1}\big) + \dots \\ \dots + \alpha_{n-1}\big(y_{n-1} - y_{n-2}\big) + \alpha_n\big(y_n - y_{n-1}\big).$$

Так как $\{y_n\}$ — возрастающая бесконечно большая последовательность, то, начиная с некоторого номера, ее элементы положительны. Будем считать, что при $n \geqslant \overline{N}$ $y_n > 0$. Тогда из последнего равенства получим

$$\frac{x_n}{y_n} - a = \frac{x_{\overline{N}} - ay_{\overline{N}}}{y_n} + \\ + \frac{\alpha_{\overline{N}+1}(y_{\overline{N}+1} - y_{\overline{N}}) + \alpha_{\overline{N}+2}(y_{\overline{N}+2} - y_{\overline{N}+1}) + \dots + \alpha_n(y_n - y_{n-1})}{y_n}.$$

Поскольку последовательность $\{y_n\}$ возрастающая, то разности $y_{k+1} - y_k$, $k = \overline{N}, \overline{N}+1, \ldots, n-1$, положительны. Поэтому из последнего соотношения имеем

$$\left|\frac{x_n}{y_n} - a\right| \leqslant \left|\frac{x_{\overline{N}} - ay_{\overline{N}}}{y_n}\right| + \\ + \frac{|\alpha_{\overline{N}+1}|(y_{\overline{N}+1} - y_{\overline{N}}) + |\alpha_{\overline{N}+2}|(y_{\overline{N}+2} - y_{\overline{N}+1}) + \ldots + |\alpha_n|(y_n - y_{n-1})}{y_n}. \quad (3.8)$$

Докажем теперь, что последовательность $\left\{\frac{x_n}{y_n}\right\}$ сходится и имеет предел a. Для этого достаточно доказать, что для любого положительного ε можно указать номер N такой, что при $n \geqslant N$ выполняется неравенство $\left|\frac{x_n}{y_n} - a\right| < \varepsilon$. Во-первых, по данному $\varepsilon > 0$ выберем номер $\overline{N}$ так, чтобы при $n \geqslant \overline{N}$ выполнялось неравенство $|\alpha_n| < \frac{\varepsilon}{2}$ (это возможно, поскольку последовательность $\{\alpha_n\}$ бесконечно малая). Далее, выберем номер $N \geqslant \overline{N}$ так, чтобы при $n \geqslant N$ выполнялось неравенство $\left|\frac{x_{\overline{N}} - ay_{\overline{N}}}{y_n}\right| < \frac{\varepsilon}{2}$. Такой выбор номера N возможен, поскольку число $x_{\overline{N}} - ay_{\overline{N}}$ фиксировано, а последовательность $\{y_n\}$ бесконечно большая, и поэтому последовательность $\left\{\frac{x_{\overline{N}} - ay_{\overline{N}}}{y_n}\right\}$ бесконечно малая. Пусть теперь $n \geqslant N$. Из неравенства (3.8) имеем

$$\left|\frac{x_n}{y_n} - a\right| < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2}\,\frac{(y_{\overline{N}+1} - y_{\overline{N}}) + (y_{\overline{N}+2} - y_{\overline{N}+1}) + \ldots + (y_n - y_{n-1})}{y_n}.$$

или

$$\left|\frac{x_n}{y_n} - a\right| < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2}\,\frac{y_n - y_{\overline{N}}}{y_n}.$$

Так как при $n \geqslant N$ $y_n - y_{\overline{N}} \leqslant y_n$ и $y_n > 0$, то $\frac{y_n - y_{\overline{N}}}{y_n} \leqslant 1$. Поэтому при $n \geqslant N$ из последнего неравенства имеем

$$\left|\frac{x_n}{y_n} - a\right| < \varepsilon.$$

Теорема доказана.

З а м е ч а н и е. *Если $\{y_n\}$ — возрастающая бесконечно большая последовательность, а последовательность $\left\{\frac{x_n - x_{n-1}}{y_n - y_{n-1}}\right\}$ также бесконечно большая и стремится к бесконечности определенного знака, то последовательность $\left\{\frac{x_n}{y_n}\right\}$ бесконечно большая.*

В самом деле, пусть

$$\frac{x_n - x_{n-1}}{y_n - y_{n-1}} = A_n.$$

Последовательность $\{A_n\}$ бесконечно большая. Имеем при $n \geqslant \overline{N}$

$$x_{\overline{N}+1} - x_{\overline{N}} = A_{\overline{N}+1}(y_{\overline{N}+1} - y_{\overline{N}}),$$
$$\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots$$
$$x_n - x_{n-1} = A_n(y_n - y_{n-1}).$$

Складывая эти равенства, найдем

$$x_n - x_{\overline{N}} = A_{\overline{N}+1}(y_{\overline{N}+1} - y_{\overline{N}}) + \ldots + A_n(y_n - y_{n-1}).$$

Отсюда

$$\frac{x_n}{y_n} = \frac{A_{\overline{N}+1}(y_{\overline{N}+1} - y_{\overline{N}}) + \ldots + A_n(y_n - y_{n-1})}{y_n} + \frac{x_{\overline{N}}}{y_n}.$$

Из этого соотношения имеем

$$\left|\frac{x_n}{y_n}\right| \geqslant \left|\frac{A_{\overline{N}+1}(y_{\overline{N}+1} - y_{\overline{N}}) + \ldots + A_n(y_n - y_{n-1})}{y_n}\right| - \left|\frac{x_{\overline{N}}}{y_n}\right|. \tag{3.9}$$

Будем для определенности считать, что при $n \geqslant \overline{N}$ элементы последовательностей $\{y_n\}$ и $\{A_n\}$ положительны. Выберем, далее, по заданному положительному A номер $\overline{N}$ так, чтобы при $n \geqslant \overline{N}$ выполнялось неравенство $A_n > 4A$, затем такое $N \geqslant \overline{N}$, что при $n \geqslant N$

$$\left|\frac{x_{\overline{N}}}{y_n}\right| < A, \quad \frac{y_{\overline{N}}}{y_n} < \frac{1}{2}.$$

Возможность выбора такого N обеспечивается тем, что последовательности $\{A_n\}$ и $\{y_n\}$ бесконечно большие и их члены, начиная с некоторого номера, положительны. Очевидно, при $n \geqslant N$ из неравенства (3.9) имеем

$$\left|\frac{x_n}{y_n}\right| > 4A\frac{(y_{\overline{N}+1} - y_{\overline{N}}) + \ldots + (y_n - y_{n-1})}{y_n} - \left|\frac{x_{\overline{N}}}{y_n}\right|,$$

или

$$\left|\frac{x_n}{y_n}\right| > 4A\left(1 - \frac{y_{\overline{N}}}{y_n}\right) - A > A.$$

Таким образом, последовательность $\left\{\frac{x_n}{y_n}\right\}$ бесконечно большая.

Рассмотрим несколько примеров.

1°. Докажем, что если последовательность $\{a_n\}$ сходится и имеет предел a, то последовательность $\left\{\frac{a_1 + a_2 + \ldots + a_n}{n}\right\}$ средних арифметических значений элементов последовательности $\{a_n\}$ сходится к тому же самому пределу a [1]). В самом деле, если положить $a_1 + a_2 + \ldots + a_n = x_n$, а $y_n = n$, то $\frac{x_n - x_{n-1}}{y_n - y_{n-1}} = a_n$. Так как $\lim\limits_{n\to\infty} \frac{x_n - x_{n-1}}{y_n - y_{n-1}} = \lim\limits_{n\to\infty} a_n$ существует, то по теореме Штольца

$$\lim_{n\to\infty} \frac{a_1 + a_2 + \ldots + a_n}{n} = \lim_{n\to\infty} a_n = a.$$

[1]) Это предложение было доказано Коши.

2°. Рассмотрим теперь последовательность a_n, где

$$a_n = \frac{1^k + 2^k + \ldots + n^k}{n^{k+1}}$$

и k — целое положительное число.

Обозначим $1^k + 2^k + \ldots + n^k$ через x_n, а n^{k+1} через y_n. Тогда последовательность $\{a_n\}$ приобретает вид $\left\{\frac{x_n}{y_n}\right\}$. Исследуем сходимость последовательности $\left\{\frac{x_n - x_{n-1}}{y_n - y_{n-1}}\right\}$. Имеем

$$\frac{x_n - x_{n-1}}{y_n - y_{n-1}} = \frac{n^k}{n^{k+1} - (n-1)^{k+1}} = \frac{n^k}{(k+1)n^k - \frac{(k+1)}{2}n^{k-1} + \ldots + (-1)^{k+1}}.$$

Поделив числитель и знаменатель последнего выражения на n^k, получим

$$\frac{x_n - x_{n-1}}{y_n - y_{n-1}} = \frac{1}{k + 1 + \frac{1}{n}[\ldots]},$$

где в знаменателе в квадратных скобках опущено выражение, предел которого при $n \to \infty$ равен $\left[-\frac{(k+1)k}{2}\right]$. Из последней формулы находим

$$\lim_{n\to\infty} \frac{x_n - x_{n-1}}{y_n - y_{n-1}} = \frac{1}{k+1}.$$

Следовательно, по теореме Штольца имеем

$$\lim_{n\to\infty} \frac{1^k + 2^k + \ldots + n^k}{n^{k+1}} = \frac{1}{k+1}.$$

3°. Рассмотрим, наконец, последовательность $\left\{\frac{a^n}{n}\right\}$, $a > 1$. Полагая $a^n = x_n$ и $n = y_n$ и исследуя последовательность $\left\{\frac{x_n - x_{n-1}}{y_n - y_{n-1}}\right\}$, находим

$$\lim_{n\to\infty} \frac{x_n - x_{n-1}}{y_n - y_{n-1}} = \lim_{n\to\infty} (a^n - a^{n-1}) = \lim_{n\to\infty} a^n\left(1 - \frac{1}{a}\right) = +\infty.$$

Поэтому, в силу замечания к теореме Штольца, имеем

$$\lim_{n\to\infty} \frac{a^n}{n} = +\infty.$$

ДОПОЛНЕНИЕ 2

О СКОРОСТИ СХОДИМОСТИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ, ПРИБЛИЖАЮЩЕЙ $\sqrt{a}$

В п. 3 § 3 этой главы мы доказали, что предел последовательности $\{x_n\}$, определяемой рекуррентной формулой

$$x_{n+1} = \frac{1}{2}\left(x_n + \frac{a}{x_n}\right), \qquad n = 1, 2, \ldots, \qquad (3.10)$$

где $a > 0$, а x_1 — любое положительное число, равен $\sqrt{a}$. В качестве приближенного значения $\sqrt{a}$ мы можем взять любой элемент x_{n+1} этой последовательности. При этом, естественно, нужно выяснить вопрос о выборе числа n итераций [1], обеспечивающих приближение $\sqrt{a}$ с заданной погрешностью.

Обратимся к последовательности $\{x_n\}$, определяемой реккурентной формулой (3.10). Будем называть элемент x_n этой последовательности n-м *приближением числа* $\gamma = \sqrt{a}$. Величину

$$\varepsilon_n = \frac{x_n - \gamma}{\gamma} \tag{3.11}$$

назовем *относительной погрешностью* n-го приближения.

Справедливо следующее *утверждение* об оценке относительной погрешности ε_{n+1} через относительную погрешность ε_1 первого приближения.

Пусть x_1 *выбрано так, что* $|\varepsilon_1| < 1/2$. *Тогда при любом* $n \geqslant 1$ *имеют место неравенства*

$$0 \leqslant \varepsilon_{n+1} \leqslant \varepsilon_1^{2^n}. \tag{3.12}$$

Доказательство. Из формулы (3.11) имеем

$$x_n = \gamma(1 + \varepsilon_n). \tag{3.13}$$

Обращаясь к формулам (3.10), (3.13) и к равенству $\dfrac{a}{\gamma} = \gamma$, получим

$$x_{n+1} = \frac{1}{2}\left(x_n + \frac{a}{x_n}\right) = \frac{1}{2}\left[\gamma(1+\varepsilon_n) + \frac{a}{\gamma(1+\varepsilon_n)}\right] = \gamma\left[1 + \frac{\varepsilon_n^2}{2(1+\varepsilon_n)}\right].$$

Так как $x_{n+1} = \gamma(1 + \varepsilon_{n+1})$, то, очевидно,

$$\varepsilon_{n+1} = \frac{1}{2(1+\varepsilon_n)}\varepsilon_n^2. \tag{3.14}$$

По условию $|\varepsilon_1| < 1/2$. Отсюда следуют неравенства $0 < \dfrac{1}{2(1+\varepsilon_1)} < 1$. Но тогда из (3.14) при $n = 1$ вытекает неравенство $\varepsilon_2 \geqslant 0$. Используя далее соотношение (3.14) при $n = 2, 3, \ldots$, убедимся в неотрицательности ε_{n+1} для любого $n \geqslant 1$.

Из равенства (3.14), из соотношений $0 < \dfrac{1}{2(1+\varepsilon_1)} < 1$ и из неотрицательности ε_n для любого $n > 1$ вытекает неравенство $\varepsilon_{n+1} \leqslant \varepsilon_n^2$ для любого $n \geqslant 1$. Отсюда сразу же получаем правое из неравенств (3.12). Утверждение доказано.

Обращаясь к неравенствам (3.12), мы видим, что относительная погрешность ε_{n+1} вычисления $\sqrt{a}$ после n итераций оценивается через относительную погрешность ε_1 первого приближения x_1 и число n итераций. Ниже мы убедимся, что при $a > 1$ [2] первое приближение x_1 можно выбрать так, что ε_1 по абсолютной величине не будет превышать $0,05$. Очевидно, что при таком выборе x_1 относительная погрешность ε_1 будет удовлетворять условиям доказанного нами утверждения. Ясно также, что тем самым будет

[1]) Итерация (от латинского слова «iteratio» — повторение) — результат повторного применения какой-либо математической операции. В рассматриваемом случае *одной* итерацией является вычисление x_{n+1} по x_n с помощью рекуррентной формулы (3.10).

[2]) Если $a < 1$, то $a = 1/b$, где $b > 1$, и $\sqrt{a}$ равен $1/\sqrt{b}$.

решен вопрос о выборе числа n итераций, обеспечивающих приближение к $\sqrt{a}$ с заданной относительной погрешностью ε: *это число n может быть найдено из формулы* [1])

$$(0,05)^{2^n} < \varepsilon. \tag{3.15}$$

Итак, пусть $a > 1$. Представим число a в следующей форме:

$$a = 2^{2k+i} M, \tag{3.16}$$

где k — целое неотрицательное число, число i равно либо нулю, либо единице, а число M удовлетворяет условиям

$$1 \leqslant M < 2. \tag{3.17}$$

Отметим, что представление числа a в форме (3.16) единственно.

Выберем x_1 следующим образом:

$$x_1 = 2^k \left(\frac{1}{3} \cdot 2^i M + \frac{17}{24} \right). \tag{3.18}$$

Убедимся, что *для любого M*, удовлетворяющего условиям (3.17), первое приближение x_1, вычисляемое по формуле (3.18), дает относительную ошибку ε_1 при вычислении $\gamma = \sqrt{a}$, превышающую по абсолютной величине числа $0,05$.

Для доказательства обратимся к точному выражению относительной ошибки $\varepsilon_1 = \dfrac{x_1 - \gamma}{\gamma}$. Так как, согласно (3.16), $\gamma = 2^k \sqrt{2^i M}$, то из выражения для ε_1 и формулы (3.18) получим

$$\varepsilon_1 = \frac{\dfrac{1}{3} \cdot 2^i M + \dfrac{17}{24} - \sqrt{2^i M}}{\sqrt{2^i M}}. \tag{3.19}$$

Поскольку число i равно либо нулю, либо единице, а $M \geqslant 1$, то $\sqrt{2^i M} \geqslant 1$. Отсюда и из (3.19) вытекает неравенство

$$|\varepsilon_1| \leqslant \left| \frac{1}{3} \cdot 2^i M + \frac{17}{24} - \sqrt{2^i M} \right|. \tag{3.20}$$

Обозначим $\sqrt{2^i M}$ через X. Поскольку $1 \leqslant M < 2$ и i равно либо нулю, либо единице, то все допустимые значения X наверняка находятся на сегменте $[1, 2]$:

$$1 \leqslant X \leqslant 2. \tag{3.21}$$

Используя введенное обозначение X для $\sqrt{2^i M}$, перепишем неравенство (3.20) в следующей форме:

$$|\varepsilon_1| \leqslant \left| \frac{1}{3} X^2 - X + \frac{17}{24} \right|. \tag{3.22}$$

В силу (3.22) максимальное значение $|\varepsilon_1|$ не превышает максимального значения $\left| \dfrac{1}{3} X^2 - X + \dfrac{17}{24} \right|$ для значений X, удовлетворяющих условиям

---

[1]) Справедливость этой формулы непосредственно вытекает из соотношений (3.12).

(3.21). Для выяснения вопроса об этом максимальном значении обратимся к графику функции $f(X) = \frac{1}{3}X^2 - X + \frac{17}{24}$. Из курса элементарной математики известно, что графиком этой функции является парабола, вершине которой отвечает точка $X = \frac{3}{2}$ (рис. 3.4) [1]). Так как $f(1) = f(2) = \frac{1}{24}$, а $f\left(\frac{3}{2}\right) = -\frac{1}{24}$, то ясно, что для значений X, удовлетворяющих условиям (3.21), значения $f(X)$ заключены между $-\frac{1}{24}$ и $\frac{1}{24}$. Иными словами

$$|f(x)| = \left|\frac{1}{3}X^2 - X + \frac{17}{24}\right| \leqslant \frac{1}{24}.$$

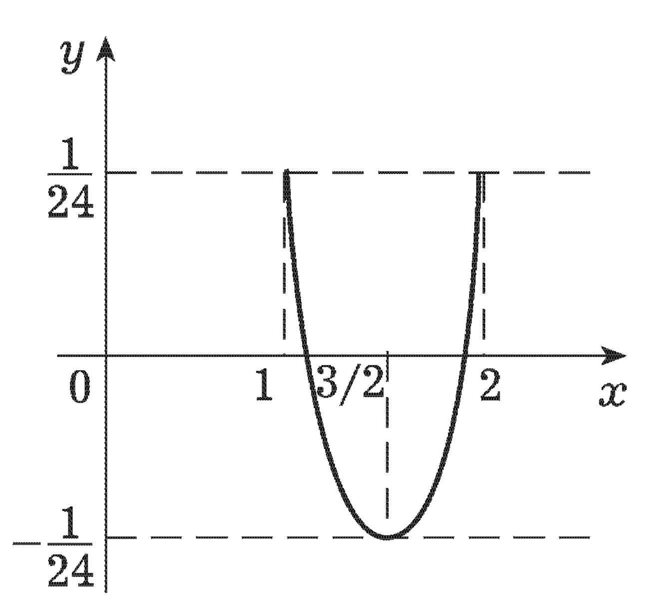


Рис. 3.4

Из последнего неравенства и неравенства (3.22) вытекает интересующее нас неравенство для ε_1

$$|\varepsilon_1| \leqslant \frac{1}{24} < 0,05.$$

З а м е ч а н и е. Отметим, что если заданная относительная погрешность ε равна 10^{-10}, то для вычисления с такой точностью квадратного корня из *любого числа* $a > 1$ после выбора x_1 по формуле (3.18) потребуется всего лишь *три итерации* ($n = 3$), поскольку $(0,05)^{2^3} < 10^{-10}$.

---

[1]) На рис. 3.4 масштаб по оси Oy в 20 раз больше масштаба по оси Ox.

ГЛАВА 4

ПОНЯТИЕ ФУНКЦИИ. ПРЕДЕЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ФУНКЦИИ. НЕПРЕРЫВНОСТЬ

Эту главу мы начнем с уточнения важнейшего понятия математического анализа — понятия функции. Опираясь на понятие предела числовой последовательности, мы введем новую форму операции предельного перехода, основанную на понятии предельного значения (или предела) функции. В этой главе вводится также важное математическое понятие непрерывности функции.

Значительное место в главе отводится выяснению свойства непрерывности и других свойств простейших элементарных функций.

Вопрос о приближенном вычислении значений элементарных функций рассматривается в Дополнении к гл. 8.

§ 1. Понятие функции

1. Переменная величина и функция. В гл. 1 мы уже отметили, что со всяким реальным физическим процессом связаны по меньшей мере две переменные величины, изменение которых взаимообусловлено.

Рассматривая реальные физические переменные величины, мы приходим к выводу, что эти величины не всегда могут принимать произвольные значения. Так, температура тела не может быть меньше $-273°$C, скорость материальной точки не может быть больше $3 \cdot 10^{10}$ см/с (т. е. скорости света в пустоте), смещение y материальной точки, совершающей гармонические колебания по закону $y = A\sin(\omega t + \delta)$, может изменяться лишь в пределах сегмента $[-A, +A]$.

В математике отвлекаются от конкретных физических свойств наблюдаемых в природе переменных величин и рассматривают абстрактную переменную величину [1], характеризу-

---

[1] Уместно отметить, что понятие величины относится к числу начальных математических понятий (см. сноску [2] на с. 20).

емую только численными значениями, которые она может принимать.

Множество $\{x\}$ всех значений, которые может принимать данная переменная величина, называется *областью изменения* этой переменной величины. Переменная величина считается заданной, если задана область ее изменения. В дальнейшем мы,как

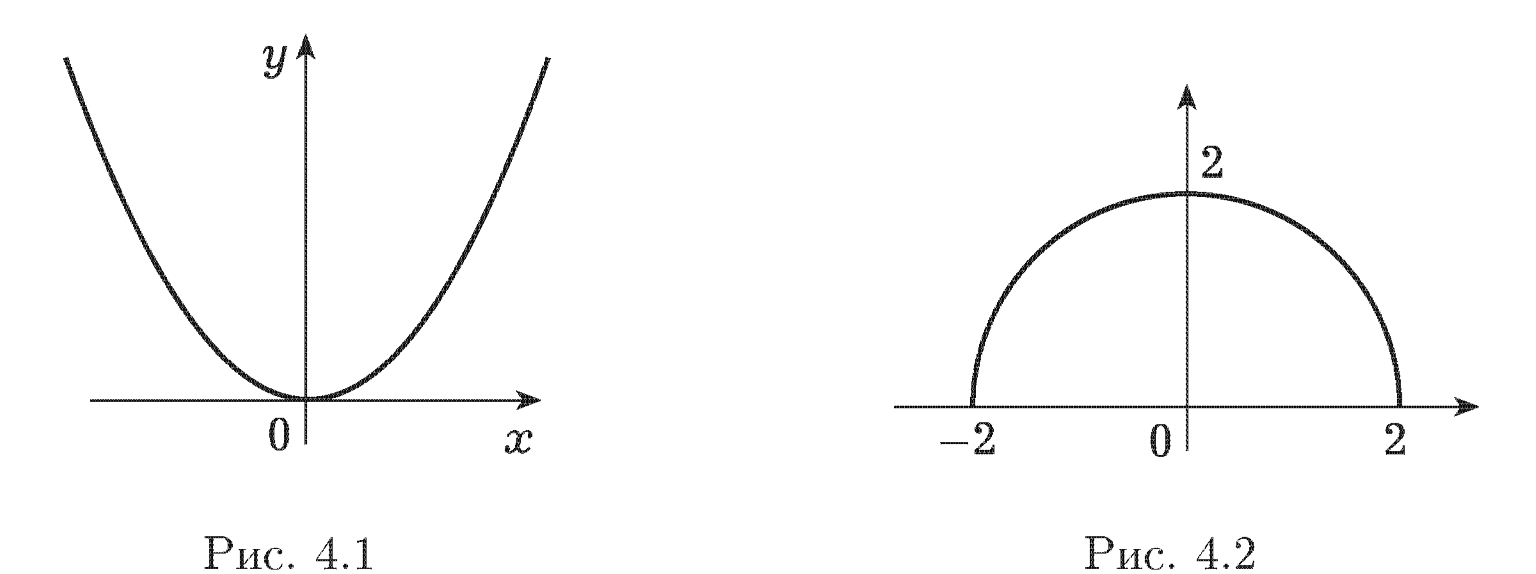


Рис. 4.1

Рис. 4.2

правило, будем обозначать переменные величины строчными латинскими буквами x, y, u, ... , а области изменения этих переменных символами $\{x\}$, $\{y\}$, $\{u\}$, ...

Пусть задана переменная величина x, имеющая областью изменения некоторое множество $\{x\}$.

Если каждому значению переменной x из множества $\{x\}$ ставится в соответствие по известному закону некоторое число y, то говорят, что на множестве $\{x\}$ задана функция $y = y(x)$ или $y = f(x)$.

При этом переменная x называется аргументом, а множество $\{x\}$ — областью задания функции $y = f(x)$.

Число y, которое соответствует данному значению аргумента x, называется частным значением функции в точке x. Совокупность всех частных значений функции образует вполне определенное множество $\{y\}$, называемое множеством всех значений функции.

В обозначении $y = f(x)$ буква f называется *характеристикой* функции. Для обозначения аргумента, функции и ее характеристики могут употребляться различные буквы.

Рис. 4.3

Приведем примеры функций:

1°. $y = x^2$. Эта функция задана на бесконечной прямой $-\infty < x < +\infty$. Множество всех значений этой функции — полупрямая $0 \leqslant y < +\infty$ (рис. 4.1).

2°. $y = \sqrt{1 - x^2}$. Функция задана на сегменте $-1 \leqslant x \leqslant +1$. Множество всех значений функции — сегмент $0 \leqslant y \leqslant 1$ (рис. 4.2).

3°. $y = n!$. Эта функция задана на множестве натуральных чисел $n = 1, 2, \ldots$ Множество всех значений этой функции — множество натуральных чисел вида $n!$ (рис. 4.3).

4°. Функция Дирихле [1])

$$y = \begin{cases} 0, & \text{если } x \text{ — иррациональное число,} \\ 1, & \text{если } x \text{ — рациональное число.} \end{cases}$$

Эта функция задана на бесконечной прямой $-\infty < x < +\infty$, а множество всех ее значений состоит из двух точек 0 и 1.

5°.

$$y = \operatorname{sgn} x = \begin{cases} +1, & \text{если} \quad x > 0, \\ 0, & \text{если} \quad x = 0, \\ -1, & \text{если} \quad x < 0. \end{cases}$$

(Термин sgn происходит от латинского слова signum — знак.) Эта функция задана на всей бесконечной прямой $-\infty < x < +\infty$, а множество всех ее значений состоит из трех точек: -1, 0 и $+1$ (рис. 4.4).

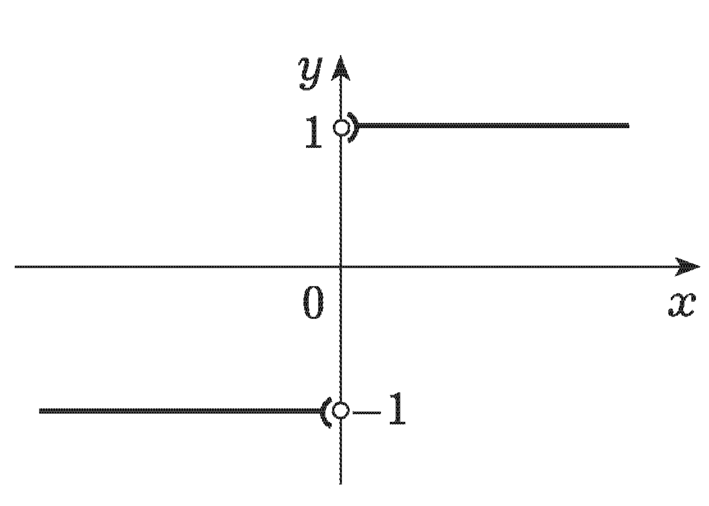


Рис. 4.4

6°. $y = [x]$, где $[x]$ обозначает целую часть вещественного числа x. Читается: «y равно антье x» (от французского слова entier — целый). Эта функция задана для всех вещественных значений x, а множество всех ее значений состоит из целых чисел (рис. 4.5).

2. О способах задания функции. В этом пункте мы остановимся на некоторых способах задания функции.

Часто закон, устанавливающий связь между аргументом и функцией, задается с помощью формул. Такой способ задания функции называется *аналитическим*. Следует подчеркнуть, что функция может определяться разными формулами на разных участках области своего задания.

Например, функция

$$y = \begin{cases} \sin x & \text{при} \quad x \leqslant 0, \\ x^2 & \text{при} \quad x > 0 \end{cases}$$

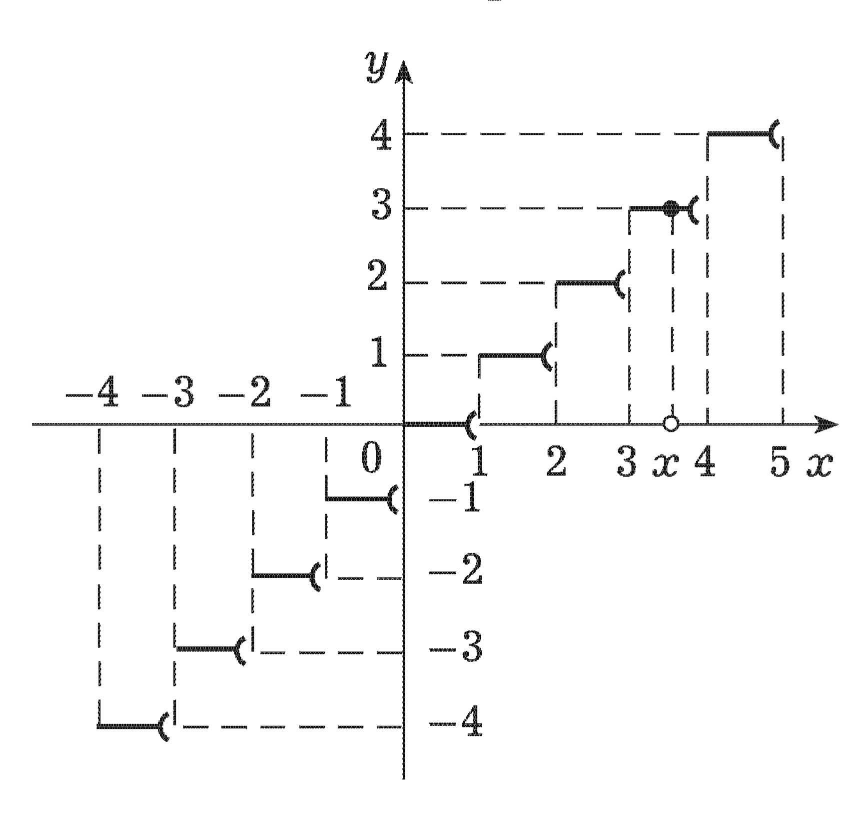


Рис. 4.5

[1]) Петер Густав Лежен-Дирихле — немецкий математик (1805–1859).

задана аналитическим способом на всей бесконечной прямой (рис. 4.6).

Довольно распространенным способом задания функции является *табличный способ*, заключающийся в задании таблицы отдельных значений аргумента и соответствующих им значений функции. При этом можно приближенно вычислить не содержащиеся в таблице значения функции, соответствующие промежуточным значениям аргумента. Для используется *способ интерполяции*, заключающийся в замене функции между ее табличными значениями какой-либо простой функцией (например, линейной или квадратичной). Примером табличного задания функции может служить расписание движения поезда. Расписание определяет местоположение поезда в отдельные моменты времени. Интерполяция позволяет приближенно определить местоположение поезда в любой промежуточный момент времени.

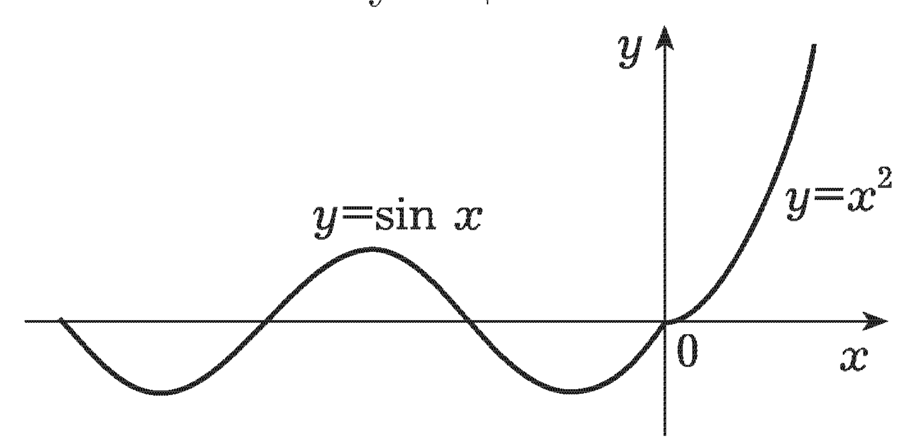


Рис. 4.6

В практике физических измерений используется и еще один способ задания функции — *графический*, при котором соответствие между аргументом и функцией задается посредством графика (снимаемого, например, на осциллографе).

§ 2. Понятие предельного значения функции

1. Определение предельного значения функции. Рассмотрим функцию $y = f(x)$, определенную на некотором множестве $\{x\}$, и точку a, быть может, и не принадлежащую множеству $\{x\}$, но обладающую тем свойством, что в любой ε-окрестности точки a имеются точки множества $\{x\}$, отличные от a. Например, точка a может быть граничной точкой интервала, на котором определена функция.

Определение 1. *Число b называется предельным значением функции $y = f(x)$ в точке $x = a$ (или пределом функции при $x \to a$), если для любой сходящейся к a последовательности $x_1, x_2, \ldots, x_n, \ldots$ значений аргумента x, элементы x_n которой отличны от a* [1] *($x_n \neq a$), соответствующая последовательность $f(x_1), f(x_2), \ldots, f(x_n), \ldots$ значений функции сходится к b.*

[1] Это требование объясняется, в частности, тем, что функция $f(x)$ может быть не определена в точке a.

Для обозначения предельного значения функции используется следующая символика: $\lim\limits_{x\to a} f(x) = b$.

Отметим, что *функция* $y = f(x)$ *может иметь в точке* a *только одно предельное значение.* Это вытекает из того, что последовательность $\{f(x_n)\}$ может иметь только один предел.

Рассмотрим несколько примеров.

1°. Функция $f(x) = c$ имеет предельное значение в каждой точке бесконечной прямой. В самом деле, если $x_1, x_2, \ldots, x_n, \ldots$ есть любая сходящаяся к a последовательность значений аргумента, то соответствующая последовательность значений функции имеет вид $c, c, \ldots, c, \ldots$ и поэтому сходится к c. Таким образом, предельное значение этой функции в любой точке $x = a$ равно c.

2°. Предельное значение функции $f(x) = x$ в любой точке a бесконечной прямой равно a. Действительно, в этом случае последовательности значений аргумента и функции тождественны, и поэтому, если последовательность $\{x_n\}$ сходится к a, то и последовательность $\{f(x_n)\}$ также сходится к a.

3°. Функция Дирихле, значения которой в рациональных точках равны единице, а в иррациональных — нулю, не имеет предельного значения ни в одной точке a бесконечной прямой. Действительно, для сходящейся к a последовательности рациональных значений аргумента предел соответствующей последовательности значений функции равен единице, а для сходящейся к a последовательности иррациональных значений аргумента предел соответствующей последовательности значений функции равен нулю.

В дальнейшем мы будем использовать понятия односторонних предельных значений функции.

Будем считать, что множество $\{x\}$, на котором задана функция $f(x)$, для любого $\varepsilon > 0$ имеет хотя бы один элемент , лежащий на интервале $(a, a + \varepsilon)$ (соответственно на интервале $(a - \varepsilon, a)$).

Определение 2. *Число b называется* п р а в ы м (л е в ы м) п р е д е л ь н ы м з н а ч е н и е м *функции $f(x)$ в точке $x = a$, если для любой сходящейся к a последовательности x_1, x_2, ..., x_n, ... значений аргумента x, элементы x_n которой больше (меньше) a, соответствующая последовательность $f(x_1)$, $f(x_2)$, ..., $f(x_n)$, ... значений функции сходится к b.*

Для правого предельного значения функции используется обозначение

$$\lim_{x\to a+0} f(x) = b \text{ или } f(a+0) = b.$$

Для левого предельного значения употребляется обозначение

$$\lim_{x\to a-0} f(x) = b \text{ или } f(a-0) = b.$$

В качестве примера рассмотрим функцию $f(x) = \operatorname{sgn} x$ [1]. Эта функция имеет в нуле правое и левое предельные значения, причем $\operatorname{sgn}(0+0) = 1$, а $\operatorname{sgn}(0-0) = -1$. В самом деле, если $\{x_n\}$ — любая сходящаяся к нулю последовательность значений аргумента этой функции, элементы x_n которой больше нуля ($x_n > 0$), то $\operatorname{sgn} x_n = 1$ и поэтому $\lim\limits_{n\to\infty} \operatorname{sgn} x_n = 1$. Таким образом, справедливость равенства $\operatorname{sgn}(0+0) = 1$ установлена. Аналогично доказывается, что $\operatorname{sgn}(0-0) = -1$.

З а м е ч а н и е. *Если в точке a правое и левое предельные значения функции $f(x)$ равны, то в точке a существует предельное значение этой функции, равное указанным односторонним предельным значениям.* Этот наглядный факт мы снабдим доказательством.

Пусть $\{x_n\}$ — любая сходящаяся к a последовательность значений аргумента функции $f(x)$, элементы которой не равны a. Пусть $\{x_{k_m}\}$ — подпоследовательность этой последовательности, состоящая из всех бóльших a элементов последовательности $\{x_n\}$, а $\{x_{l_m}\}$ — подпоследовательность, состоящая из всех меньших a элементов последовательности $\{x_n\}$ [2]. Так как в силу п. 1 § 4 гл. 3 подпоследовательности $\{x_{k_m}\}$ и $\{x_{l_m}\}$ сходятся к a, то из существования правого и левого предельных значений функции $f(x)$ в точке a вытекает, что последовательности $\{f(x_{k_m})\}$ и $\{f(x_{l_m})\}$ имеют пределы, которые по условию равны. Пусть b — предел этих последовательностей. Для любого $\varepsilon > 0$ можно указать номер N такой, что все элементы последовательностей $\{f(x_{k_m})\}$ и $\{f(x_{l_m})\}$, для которых $k_m \geqslant N$ и $l_m \geqslant N$, удовлетворяют неравенствам $|f(x_{k_m}) - b| < \varepsilon$ и $|f(x_{l_m}) - b| < \varepsilon$. Следовательно, при $n \geqslant N$ выполняется неравенство $|f(x_n) - b| < \varepsilon$, т. е. последовательность $\{f(x_n)\}$ сходится к b. Тем самым доказано, что предельное значение функции $f(x)$ в точке a существует и равно b.

Сформулируем определения предельного значения функции при стремлении аргумента x к бесконечности и к бесконечности определенного знака.

Будем считать, что множество $\{x\}$, на котором задана функция $f(x)$, для любого $A > 0$ имеет хотя бы один элемент, лежащий вне сегмента $[-A, +A]$.

Определение 3. *Число b называется* п р е д е л ь н ы м з н а ч е н и е м ф у н к ц и и $f(x)$ п р и $x \to \infty$ *(или*

---

[1]) Определение функции $y = \operatorname{sgn} x$ дано в п. 1 § 1.

[2]) Мы исключаем из рассмотрения случай, когда у последовательности $\{x_n\}$ *лишь конечное число элементов* лежит правее (левее) точки a. В этом случае сходимость $\{f(x_n)\}$ очевидна.

пределом функции при $x \to \infty$), *если для любой бесконечно большой последовательности значений аргумента соответствующая последовательность значений функции сходится к* b.

Для обозначения предельного значения функции при $x \to \infty$ используется следующая символика:

$$\lim_{x \to \infty} f(x) = b.$$

Наконец, будем считать, что множество $\{x\}$, на котором задана функция $f(x)$, для любого $A > 0$ имеет хотя бы один элемент x, удовлетворяющий условию $x > A$ $(x < -A)$.

Определение 4. *Число b называется предельным значением функции $f(x)$ при стремлении аргумента x к положительной (отрицательной) бесконечности, если для любой бесконечно большой последовательности значений аргумента, элементы которой, начиная с некоторого номера, положительны (отрицательны), соответствующая последовательность значений функции сходится к b.*

Символические обозначения:

$$\lim_{x \to +\infty} f(x) = b \qquad \Big(\lim_{x \to -\infty} f(x) = b\Big).$$

В качестве примера рассмотрим функцию $f(x) = 1/x$. Эта функция имеет равное нулю предельное значение при $x \to \infty$. Действительно, если $x_1, x_2, \ldots, x_n, \ldots$ — бесконечно большая последовательность значений аргумента, то последовательность $1/x_1, 1/x_2, \ldots, 1/x_n, \ldots$ бесконечно малая и поэтому имеет предел, равный нулю.

2. Арифметические операции над функциями, имеющими предельное значение. Убедимся, что арифметические операции над функциями, имеющими предельное значение в точке a, приводят к функциям, также имеющим предельное значение в этой точке. Справедлива следующая *основная* теорема.

Теорема 4.1. *Пусть заданные на одном и том же множестве функции $f(x)$ и $g(x)$ имеют в точке a предельные значения b и c. Тогда функции $f(x) + g(x)$, $f(x) - g(x)$, $f(x) \cdot g(x)$ и $\dfrac{f(x)}{g(x)}$ имеют в точке a предельные значения (частное при условии $c \neq 0$), равные соответственно $b + c$, $b - c$, $b \cdot c$ и $\dfrac{b}{c}$.*

Доказательство. Пусть $x_1, x_2, \ldots, x_n, \ldots$ $(x_n \neq a)$ — произвольная сходящаяся к a последовательность значений аргумента функций $f(x)$ и $g(x)$. Соответствующие последовательности $f(x_1), f(x_2), \ldots, f(x_n), \ldots$ и $g(x_1), g(x_2), \ldots, g(x_n), \ldots$ значений этих функций имеют пределы b и c. Но тогда, в силу теорем 3.9–3.12, последовательности $\{f(x_n) + g(x_n)\}$, $\{f(x_n) -$

$- g(x_n)\}$, $\{f(x_n)\cdot g(x_n)\}$ и $\left\{\dfrac{f(x_n)}{g(x_n)}\right\}$ имеют пределы, соответственно равные $b+c$, $b-c$, $b\cdot c$ и $\dfrac{b}{c}$. В силу произвольности последовательности $\{x_n\}$ это означает, что $\lim\limits_{x\to a}[f(x)+g(x)] = b+c$, $\lim\limits_{x\to a}[f(x)-g(x)] = b-c$, $\lim\limits_{x\to a}[f(x)\cdot g(x)] = b\cdot c$, $\lim\limits_{x\to a}\dfrac{f(x)}{g(x)} = \dfrac{b}{c}$. Теорема доказана.

Применим доказанную теорему для отыскания предельных значений многочленов и несократимых алгебраических дробей [1]). Имеет место следующее утверждение.

В каждой точке a бесконечной прямой предельные значения многочленов и несократимых алгебраических дробей существуют и равны частным значениям этих функций в указанной точке (в случае алгебраической дроби a не должно быть корнем знаменателя).

Действительно, в силу теоремы 4.1

$$\lim_{x\to a} x^2 = \lim_{x\to a} x\cdot x = \lim_{x\to a} x \cdot \lim_{x\to a} x = a^2.$$

Аналогично можно убедиться, что

$$\lim_{x\to a} x^n = a^n.$$

Следовательно, для многочлена $b_0x^n + b_1x^{n-1} + \ldots + b_{n-1}x + b_n$ получим (используя теорему 4.1 для произведения и суммы)

$$\lim_{x\to a}(b_0x^n + b_1x^{n-1} + \cdots + b_{n-1}x + b_n) = \\ = b_0a^n + b_1a^{n-1} + \cdots + b_{n-1}a + b_n.$$

В случае несократимой алгебраической дроби, когда a не является корнем знаменателя, получим (применяя теорему 4.1 для частного)

$$\lim_{x\to a}\frac{b_0x^n + b_1x^{n-1} + \ldots + b_{n-1}x + b_n}{c_0x^m + c_1x^{m-1} + \ldots + c_{m-1}x + c_m} = \frac{b_0a^n + b_1a^{n-1} + \ldots + b_{n-1}a + b_n}{c_0a^m + c_1a^{m-1} + \ldots + c_{m-1}a + c_m}.$$

3. Сравнение бесконечно малых и бесконечно больших функций. *Функция $y = f(x)$ называется бесконечно малой в точке $x = a$ (при $x \to a$), если* $\lim\limits_{x\to a} f(x) = 0$. Легко убедиться, например, что функция $f(x) = (x-a)^m$, где m — целое положительное число, является бесконечно малой в точке $x = a$. В самом деле, в предыдущем пункте мы установили, что

[1]) Несократимая алгебраическая дробь — частное двух многочленов, не имеющих отличных от постоянной общих множителей.

предельное значение многочлена $f(x) = (x-a)^m$ в любой точке бесконечной прямой существует и равно частному значению многочлена в этой точке. Поэтому $\lim\limits_{x\to a}(x-a)^m = 0$.

Отметим, что *если функция $y = f(x)$ имеет равное b предельное значение в точке a, то функция $\alpha(x) = f(x) - b$ является бесконечно малой в точке a.* Действительно, предельные значения каждой из функций $f(x)$ и b в точке a равны b, и поэтому в силу теоремы 4.1

$$\lim_{x\to a}\alpha(x) = \lim_{x\to a}(f(x)-b) = \lim_{x\to a}f(x) - \lim_{x\to a}b = 0.$$

Используя полученный результат, мы получаем специальное представление для функции, имеющей равное b предельное значение в точке $x = a$:

$$f(x) = b + \alpha(x), \text{ где } \lim_{x\to a}\alpha(x) = 0. \tag{4.1}$$

Представление (4.1) оказывается весьма удобным при доказательстве различных предложений и будет неоднократно использовано нами ниже.

Наряду с понятием бесконечно малой функции часто используется понятие функции, бесконечно большой в точке a справа или бесконечно большой в точке a слева. Именно, *функция $f(x)$ называется бесконечно большой в точке a справа (слева), если для любой сходящейся к a последовательности x_1, x_2, ... , x_n ... значений аргумента x, элементы x_n которой больше a (меньше a), соответствующая последовательность $f(x_1)$, $f(x_2)$, ... , $f(x_n)$, ... значений функции является бесконечно большой последовательностью определенного знака.*

Для бесконечно больших функций используются следующие обозначения:

$$\lim_{x\to a+0} f(x) = +\infty \quad \text{или} \quad f(a+0) = +\infty,$$
$$\lim_{x\to a-0} f(x) = +\infty \quad \text{или} \quad f(a-0) = +\infty,$$
$$\lim_{x\to a+0} f(x) = -\infty \quad \text{или} \quad f(a+0) = -\infty,$$
$$\lim_{x\to a-0} f(x) = -\infty \quad \text{или} \quad f(a-0) = -\infty.$$

Познакомимся с методикой сравнения бесконечно малых функций и употребляемой терминологией.

Пусть $\alpha(x)$ и $\beta(x)$ — две заданные на одном и том же множестве функции, являющиеся бесконечно малыми в точке $x = a$.

1. Функция $\alpha(x)$ называется *бесконечно малой более высокого порядка, чем $\beta(x)$* (имеет более высокий порядок малости), если предельное значение функции $\alpha(x)/\beta(x)$ в точке a равно нулю.

2. Функции $\alpha(x)$ и $\beta(x)$ называются *бесконечно малыми одного порядка* (имеют одинаковый порядок малости), если предельное значение функции $\alpha(x)/\beta(x)$ в точке a существует и отлично от нуля.

3. Функции $\alpha(x)$ и $\beta(x)$ называются *эквивалентными бесконечно малыми*, если предельное значение функции $\alpha(x)/\beta(x)$ в точке a равно единице.

Часто бесконечно малые функции сравнивают с какими-либо стандартными бесконечно малыми функциями. Обычно в качестве функции сравнения берут функцию $(x-a)^m$, где m — целое положительное число. В этом случае употребляется следующая терминология: бесконечно малая в точке a функция $\alpha(x)$ имеет *порядок малости* m, если предельное значение функции $\dfrac{\alpha(x)}{(x-a)^m}$ в точке a отлично от нуля.

При сравнении бесконечно малых функций часто употребляют символ o (o малое). Именно, если функция $\alpha = \alpha(x)$ представляет собой бесконечно малую в точке a функцию более высокого порядка, чем бесконечно малая в этой же точке функция $\beta = \beta(x)$, то это условно записывают так:

$$\alpha = o(\beta)$$

(читается: α равно o малое от β). Таким образом, символ $o(\beta)$ означает *любую* бесконечно малую функцию, имеющую в точке a более высокий порядок малости, чем бесконечно малая в этой точке функция $\beta = \beta(x)$.

Отметим следующие очевидные свойства символа o: если $\gamma = o(\beta)$, то $o(\beta) \pm o(\gamma) = o(\beta)$, $o(\beta) \pm o(\beta) = o(\beta)$.

Заметим также, что если α и β — бесконечно малые в точке a функции, то функция $\alpha\beta$ имеет более высокий порядок малости, чем каждый из сомножителей, и поэтому

$$\alpha\beta = o(\alpha), \ \alpha\beta = o(\beta).$$

Для бесконечно больших в точке a справа (или слева) функций используется аналогичная методика сравнения.

Пусть $A(x)$ и $B(x)$ — бесконечно большие в точке a справа функции, и пусть, например, обе эти бесконечно большие функции положительного знака, т. е.

$$\lim_{x\to a+0} A(x) = +\infty \quad \text{и} \quad \lim_{x\to a+0} B(x) = +\infty.$$

Мы будем говорить, что функция $A(x)$ имеет в точке a справа *более высокий порядок роста*, чем функция $B(x)$, если функция $\dfrac{A(x)}{B(x)}$ является бесконечно большой в точке a справа. Если же правое предельное значение функции $\dfrac{A(x)}{B(x)}$ в точке a конечно и

отлично от нуля, то в этом случае мы будем говорить, что $A(x)$ и $B(x)$ имеют в точке a справа *одинаковый порядок роста.*

Рассмотрим несколько примеров.

1°. Функции $\alpha(x) = 3x^2 + x^3$ и $\beta(x) = 2x^2$ являются бесконечно малыми функциями одного порядка в точке $x = 0$. Действительно, при $x \neq 0$ $\dfrac{\alpha(x)}{\beta(x)} = \dfrac{3}{2} + \dfrac{1}{2}x$. Так как $\lim\limits_{x\to 0}\dfrac{1}{2}x = 0$, то в силу теоремы 4.1 $\lim\limits_{x\to 0}\dfrac{\alpha(x)}{\beta(x)} = \dfrac{3}{2}$. А это означает, что $\alpha(x)$ и $\beta(x)$ — бесконечно малые одного порядка.

2°. Функции $\alpha(x) = x^2 - 6x^3$ и $\beta(x) = x^2$ — эквивалентные бесконечно малые в точке $x = 0$. В самом деле, $\dfrac{\alpha(x)}{\beta(x)} = 1 - 6x$. Так как $\lim\limits_{x\to 0} 6x = 0$, то в силу теоремы 4.1 $\lim\limits_{x\to 0}\dfrac{\alpha(x)}{\beta(x)} = 1$. Это и означает эквивалентность бесконечно малых $\alpha(x)$ и $\beta(x)$.

3°. Функции $A(x) = \dfrac{1+x}{x}$ и $B(x) = \dfrac{1}{x}$ имеют одинаковый порядок роста в точке $x = 0$ справа и слева. Это следует из того, что $\lim\limits_{x\to 0}\dfrac{A(x)}{B(x)} = \lim\limits_{x\to 0}(1+x) = 1$.

§ 3. Понятие непрерывности функции

1. Определение непрерывности функции. Пусть точка a принадлежит области задания функции $f(x)$ и любая ε-окрестность точки a содержит отличные от a точки области задания этой функции.

Определение 1. *Функция $f(x)$ называется непрерывной в точке a, если предельное значение этой функции в точке a существует и равно частному значению $f(a)$.*

Таким образом, условие непрерывности функции $f(x)$ в точке a символически можно выразить следующим образом:

$$\lim_{x\to a} f(x) = f(a).$$

Так как $a = \lim\limits_{x\to a} x$, то предыдущему равенству можно придать следующую форму:

$$\lim_{x\to a} f(x) = f\left(\lim_{x\to a} x\right).$$

Следовательно, для непрерывной функции символ «lim» предельного перехода и символ «f» характеристики функции можно менять местами.

Используя определение 1 предельного значения функции $f(x)$ в точке a (см. п. 1 § 2 настоящей главы), мы можем следующим образом перефразировать определение 1 непрерывности функции в точке a.

Определение 1*. *Функция $f(x)$ называется н е п р е р ы в н о й в точке a, если для любой сходящейся к a последовательности $x_1, x_2, \ldots, x_n, \ldots$ значений аргумента x соответствующая последовательность $f(x_1), f(x_2), \ldots, f(x_n), \ldots$ значений этой функции сходится к числу $f(a)$.*

Заметим, что, по сравнению с определением 1 из п. 1 § 2 предельного значения $f(x)$ в точке a, мы в определении 1* опустили требование, обязывающее все элементы последовательности $x_1, x_2, \ldots, x_n, \ldots$ быть отличными от a. Это можно сделать в силу того, что добавление к элементам последовательности $\{f(x_n)\}$, сходящейся к $f(a)$, любого числа новых элементов, равных $f(a)$, не нарушит сходимости получающейся при этом последовательности к $f(a)$.

Предположим, что множество $\{x\}$, на котором задана функция $f(x)$, содержит точку a и для любого $\varepsilon > 0$ имеется хотя бы один элемент этого множества, лежащий на интервале $(a, a+\varepsilon)$ (на интервале $(a-\varepsilon, a)$).

Определение 2. *Функция $f(x)$ называется н е п р е р ы в н о й с п р а в а (с л е в а) в точке a, если правое (левое) предельное значение этой функции в точке a существует и равно частному значению $f(a)$.*

Символические обозначения непрерывности справа (слева):

$$\lim_{x\to a+0} f(x) = f(a) \quad \text{или} \quad f(a+0) = f(a)$$

$$\Big(\lim_{x\to a-0} f(x) = f(a) \quad \text{или} \quad f(a-0) = f(a)\Big).$$

З а м е ч а н и е. *Если функция $f(x)$ непрерывна в точке a и слева и справа, то она непрерывна в этой точке.* В самом деле, в силу замечания п. 1 § 2 этой главы в этом случае существует предельное значение функции в точке a, равное частному значению этой функции в точке a.

Рассмотрим примеры.

1°. Степенная функция $f(x) = x^n$ с целочисленным положительным показателем n непрерывна в каждой точке бесконечной прямой. Действительно, в п. 2 § 2 мы доказали, что предельное значение этой функции в любой точке бесконечной прямой равно частному значению a^n.

2°. Так как многочлены и несократимые алгебраические дроби имеют в каждой точке области задания предельное значение, равное частному значению (см. п. 2 § 2), то они являются непрерывными функциями.

Точки, в которых функция не обладает свойством непрерывности, называются *точками разрыва* функции [1]. Например,

---

[1] В § 8 мы дадим классификацию точек разрыва.

функция $f(x) = \operatorname{sgn} x$ имеет разрыв в точке $x = 0$ (в п. 1 § 2 мы доказали, что правое и левое предельные значения этой функции в точке $x = 0$ существуют, но не равны друг другу, и поэтому не существует предельное значение функции в этой точке). Функция Дирихле разрывна в каждой точке бесконечной прямой, поскольку она не имеет предельного значения ни в одной точке этой прямой (см. п. 1 § 2).

Мы будем говорить, что функция $f(x)$ *непрерывна на множестве* $\{x\}$, если она непрерывна в каждой точке этого множества. Если функция непрерывна в каждой точке интервала, то говорят, что она непрерывна на интервале. Если функция непрерывна в каждой внутренней точке сегмента $[a, b]$ и, кроме того, непрерывна справа в точке a и слева в точке b, то говорят, что она непрерывна на сегменте $[a, b]$.

2. Арифметические операции над непрерывными функциями. Убедимся, что арифметические операции над непрерывными функциями приводят к непрерывным функциям.

Докажем следующую *основную* теорему.

Теорема 4.2. *Пусть заданные на одном и том же множестве функции $f(x)$ и $g(x)$ непрерывны в точке a. Тогда функции $f(x)+g(x)$, $f(x)-g(x)$, $f(x)\cdot g(x)$ и $\dfrac{f(x)}{g(x)}$ непрерывны в точке a (частное при условии $g(a) \neq 0$).*

Доказательство. Так как непрерывные в точке a функции $f(x)$ и $g(x)$ имеют в этой точке предельные значения $f(a)$ и $g(a)$, то в силу теоремы 4.1 предельные значения функций $f(x) + g(x)$, $f(x) - g(x)$, $f(x) \cdot g(x)$ и $\dfrac{f(x)}{g(x)}$ существуют и равны соответственно $f(a) + g(a)$, $f(a) - g(a)$, $f(a) \cdot g(a)$, $\dfrac{f(a)}{g(a)}$. Но эти величины как раз и равны частным значениям перечисленных функций в точке a. Теорема доказана.

3. Сложная функция и ее непрерывность. Функции, образованные в результате суперпозиции (т.е. последовательного применения) двух или нескольких функций, будем называть *сложными*.

Достаточно определить сложную функцию, образованную в результате суперпозиции двух функций.

Пусть функция $x = \varphi(t)$ задана на некотором множестве $\{t\}$, и пусть $\{x\}$ — множество значений этой функции.

Предположим далее, что на указанном множестве $\{x\}$ определена другая функция $y = f(x)$. Тогда говорят, что на множестве $\{t\}$ задана сложная функция

$$y = f(x), \quad \text{где} \quad x = \varphi(t),$$

или

$$y = f[\varphi(t)] = F(t).$$

Справедлива следующая *основная* теорема.

Теорема 4.3. *Если функция $x = \varphi(t)$ непрерывна в точке a, а функция $y = f(x)$ непрерывна в соответствующей точке $b = \varphi(a)$, то сложная функция $y = f[\varphi(t)] = F(t)$ непрерывна в точке a.*

Доказательство. Пусть $\{t_n\}$ — произвольная последовательность значений аргумента сложной функции, сходящаяся к a. Так как функция $x = \varphi(t)$ непрерывна в точке a, то (в силу определения 1* из п. 1) соответствующая последовательность значений этой функции $x_n = \varphi(t_n)$ сходится к частному значению этой функции в точке a, т. е. к числу $b = \varphi(a)$. Далее, поскольку функция $y = f(x)$ непрерывна в точке $b = \varphi(a)$ и для нее указанная последовательность $\{x_n\}$, сходящаяся к $b = \varphi(a)$, является последовательностью значений аргумента, то (в силу того же определения 1* из п. 1) соответствующая последовательность значений функции $f(x_n) = f[\varphi(t_n)] = F(t_n)$ сходится к числу $f(b) = f[\varphi(a)] = F(a)$.

Итак, мы получаем, что для любой последовательности $\{t_n\}$ значений аргумента сложной функции, сходящейся к a, соответствующая последовательность значений самой сложной функции $\{f[\varphi(t_n)]\} \equiv \{F(t_n)\}$ сходится к числу $f[\varphi(a)] = F(a)$, являющемуся частным значением сложной функции в точке a. В силу того же определения 1* из п. 1 это означает, что сложная функция $f[\varphi(t)] = F(t)$ непрерывна в точке a. Теорема доказана.

§ 4. Некоторые свойства монотонных функций

1. Определение и примеры монотонных функций.

Определение. *Функция $y = f(x)$ называется неубывающей (невозрастающей) на множестве $\{x\}$, если для любых x_1 и x_2 из этого множества, удовлетворяющих условию $x_1 < x_2$, справедливо неравенство $f(x_1) \leqslant f(x_2)$ $(f(x_1) \geqslant f(x_2))$.*

Неубывающие и невозрастающие функции объединяются общим наименованием *монотонные функции.*

Если для любых x_1 и x_2 из множества $\{x\}$, удовлетворяющих условию $x_1 < x_2$, справедливо неравенство $f(x_1) < f(x_2)$ $(f(x_1) > f(x_2))$, то функция $y = f(x)$ называется *возрастающей* (*убывающей*) на множестве $\{x\}$. Возрастающие и убывающие функции называются также *строго монотонными.*

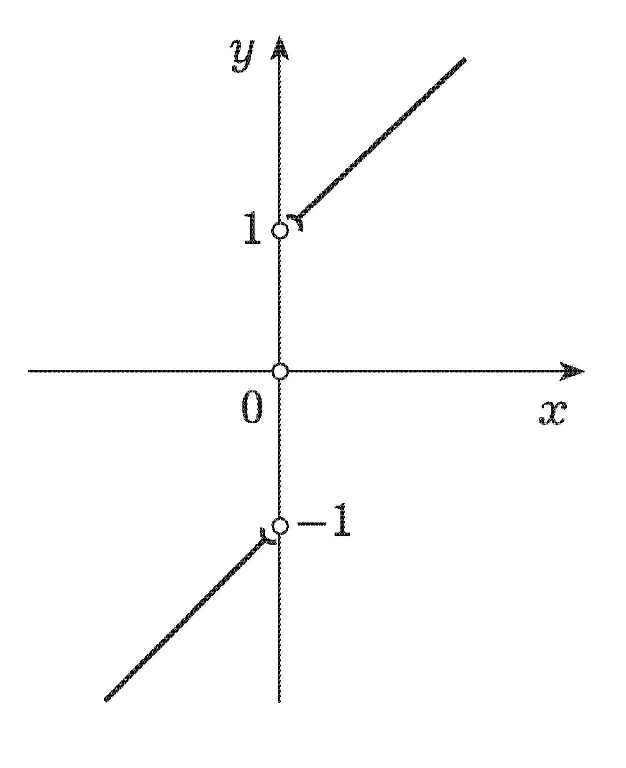


Рис. 4.7

Приведем примеры монотонных функций.

1. Функция $f(x) = x + \operatorname{sgn} x$ возрастает на всей числовой прямой (рис. 4.7).

2. Функция $f(x) = \operatorname{sgn} x$ является неубывающей на всей числовой прямой (см. рис. 4.4).

2. Понятие обратной функции. Монотонные функции, имеющие обратную. В этом пункте формулируется понятие обратной функции и устанавливаются условия существования обратной функции для монотонной функции.

Пусть функция $y = f(x)$ задана на сегменте $[a, b]$, и пусть множеством значений этой функции является сегмент $[\alpha, \beta]$. Пусть, далее, каждому y из сегмента $[\alpha, \beta]$ соответствует только одно значение x из сегмента $[a, b]$, для которого $f(x) = y$. Тогда на сегменте $[\alpha, \beta]$ можно определить функцию $x = f^{-1}(y)$, ставя в соответствие каждому y из $[\alpha, \beta]$ то значение x из $[a, b]$, для которого $f(x) = y$. Функция $x = f^{-1}(y)$ называется обратной для функции $y = f(x)$.

В указанном определении *вместо сегментов* $[a, b]$ *и* $[\alpha, \beta]$ можно было бы рассматривать *интервалы* (a, b) *и* (α, β). Можно также допускать, что один или оба интервала (a, b) и (α, β) превращаются в бесконечную прямую или в открытую полупрямую.

Отметим, что если $x = f^{-1}(y)$ — обратная функция для $y = f(x)$, то, очевидно, функция $y = f(x)$ является обратной для функции $x = f^{-1}(y)$. Поэтому функции $y = f(x)$ и $x = f^{-1}(y)$ называют также *взаимно обратными.*

Взаимно обратные функции обладают следующими очевидными свойствами:

$$f(f^{-1}(y)) = y, \quad f^{-1}(f(x)) = x.$$

Рассмотрим примеры взаимно обратных функций.

1°. Пусть на сегменте $[0, 1]$ задана функция $f(x) = 3x$. Множеством значений этой функции будет сегмент $[0, 3]$. Функция $f^{-1}(y) = \frac{1}{3}y$, определенная на сегменте $[0, 3]$, является обратной для заданной функции $f(x) = 3x$.

2°. Рассмотрим на сегменте $[0, 1]$ функцию, определенную следующим образом:

$$y = f(x) = \begin{cases} x, & \text{если } x \text{ — рациональное число,} \\ 1 - x, & \text{если } x \text{ — иррациональное число.} \end{cases}$$

Функция $x = f^{-1}(y)$, заданная на сегменте $[0, 1]$ и определенная равенствами

$$x = f^{-1}(y) = \begin{cases} y, & \text{если } y \text{ — рациональное число,} \\ 1 - y, & \text{если } y \text{ — иррациональное число,} \end{cases}$$

будет обратной к данной. В этом нетрудно убедиться непосредственной проверкой.

Замечание 1. Пусть на сегменте $[a, b]$ задана строго монотонная функция $y = f(x)$, и пусть множеством значений этой функции является сегмент $[\alpha, \beta]$. Тогда, в силу строгой монотонности функции $y = f(x)$, каждому y из $[\alpha, \beta]$ соответствует *только одно* значение x из $[a, b]$, для которого $f(x) = y$, и поэтому на сегменте $[\alpha, \beta]$ существует функция $x = f^{-1}(y)$, обратная для функции $y = f(x)$. Более того, если функция $y = f(x)$ является возрастающей на сегменте $[a, b]$, то функция $x = f^{-1}(y)$ также является возрастающей на сегменте $[\alpha, \beta]$, если же $y = f(x)$ — функция, убывающая на $[a, b]$, то $x = f^{-1}(y)$ является убывающей на сегменте $[\beta, \alpha]$. Убедимся, например, что если $y = f(x)$ – возрастающая функция, то и $x = f^{-1}(y)$ — также возрастающая функция. Действительно, если $y_1 < y_2$, то и $x_1 < x_2$ ($x_1 = f^{-1}(y_1)$ и $x_2 = f^{-1}(y_2)$), ибо из неравенства $x_1 \geqslant x_2$ и из возрастания функции $y = f(x)$ следовало бы, что $y_1 \geqslant y_2$, а это противоречит неравенству $y_1 < y_2$.

Лемма 1. *Для того чтобы строго монотонная на сегменте* $[a, b]$ *функция* $y = f(x)$ *являлась непрерывной на этом сегменте, необходимо и достаточно, чтобы любое число* γ, *заключенное между числами* $\alpha = f(a)$ *и* $\beta = f(b)$, *было значением этой функции.* Иными словами, для того чтобы строго монотонная функция $y = f(x)$ была непрерывна на сегменте $[a, b]$, необходимо и достаточно, чтобы множеством значений этой функции был сегмент $[\alpha, \beta]$ (или $[\beta, \alpha]$ при $\beta < \alpha$), где $\alpha = f(a)$ и $\beta = f(b)$.

Доказательство. 1) Необходимость. Ради определенности рассмотрим возрастающую непрерывную на сегменте $[a, b]$ функцию $y = f(x)$ (для убывающей функции доказательство аналогично). Покажем, что если $\alpha < \gamma < \beta$, то существует внутренняя точка c сегмента $[a, b]$, в которой $f(c) = \gamma$ (в силу возрастания функции $f(x)$ на сегменте $[a, b]$ такая точка c будет единственной). Обозначим через $\{x\}$ множество точек сегмента $[a, b]$, для которых $f(x) \leqslant \gamma$ (этому множеству принадлежит, например, точка a, ибо $f(a) = \alpha < \gamma$). Множество $\{x\}$ ограничено сверху и поэтому имеет точную верхнюю грань c. Докажем, что $f(c) = \gamma$. Отметим, что любое число из сегмента $[a, b]$, меньшее c, принадлежит множеству $\{x\}$ [1]), а любое число, превосходящее c, не принадлежит этому множеству [2]). Покажем, что c — внутренняя точка сегмента $[a, b]$. В

[1]) Ибо по определению точной верхней грани для любого x, меньшего c, найдется x' такое, что $x < x'$ и $f(x') \leqslant \gamma$. Но тогда из возрастания $f(x)$ следует что и $f(x) \leqslant \gamma$, т. е. x принадлежит $\{x\}$.

[2]) В силу определения точной верхней грани.

самом деле, пусть, например, $c = b$. Рассмотрим сходящуюся к b возрастающую последовательность $\{x_n\}$ значений аргумента функции $y = f(x)$. Так как $f(x)$ непрерывна в точке b слева, то $\lim\limits_{n\to\infty} f(x_n) = \beta$. С другой стороны, $f(x_n) \leqslant \gamma$ [1], и поэтому в силу теоремы 3.13 $\lim\limits_{n\to\infty} (x_n) \leqslant \gamma$. Таким образом, $\beta \leqslant \gamma$, что противоречит условию $\gamma < \beta$. Полученное противоречие доказывает, что $c < b$. Аналогично можно убедиться, что $a < c$. Так как c – внутренняя точка сегмента $[a, b]$, то найдутся $\{x'_n\}$ и $\{x''_n\}$ — сходящиеся к c возрастающая и убывающая последовательности значений аргумента x. Поскольку $f(x)$ непрерывна в точке c, то $\lim\limits_{n\to\infty} (x'_n) = \lim\limits_{n\to\infty} f(x''_n) = f(c)$. Но $f(x'_n) \leqslant \gamma$, а $f(x''_n) > \gamma$ [2]. Поэтому $\lim\limits_{n\to\infty} f(x'_n) \leqslant \gamma$, $\lim\limits_{n\to\infty} (x''_n) \geqslant \gamma$, откуда следует, что $f(c) = \gamma$.

2) Достаточность. Проведем доказательство для возрастающей на сегменте $[a, b]$ функции $y = f(x)$ (для убывающей функции рассуждения аналогичны). Пусть c — любая точка сегмента $[a, b]$ и $\gamma = f(c)$ — значение функции $y = f(x)$ в этой точке. Убедимся, что число γ является правым и левым предельным значением функции $f(x)$ в точке c (если c — граничная точка сегмента $[a, b]$, то γ является соответствующим односторонним предельным значением в этой граничной точке). Пусть $a < c \leqslant b$; докажем, что γ является левым предельным значением функции в точке c. Пусть ε — столь малое положительное число, что $\alpha < \gamma - \varepsilon$ (рис. 4.8). Поскольку по условию леммы число $\gamma - \varepsilon$ является значением функции $f(x)$, то на сегменте $[a, b]$ можно указать точку d такую, что $f(d) = \gamma - \varepsilon$. Так как функция $f(x)$ возрастает, то $d < c$. Рассмотрим теперь любую сходящуюся к c последовательность $\{x_n\}$ значений аргумента x, элементы которой меньше c. Начиная с некоторого номера N, все элементы x_n этой последовательности удовлетворяют неравенствам $d < x_n < c$ (один такой элемент изображен на рис. 4.8), так что в силу возрастания $f(x)$ при $n \geqslant N$ справедливы неравенства $f(d) < f(x_n) < f(c)$. Так как

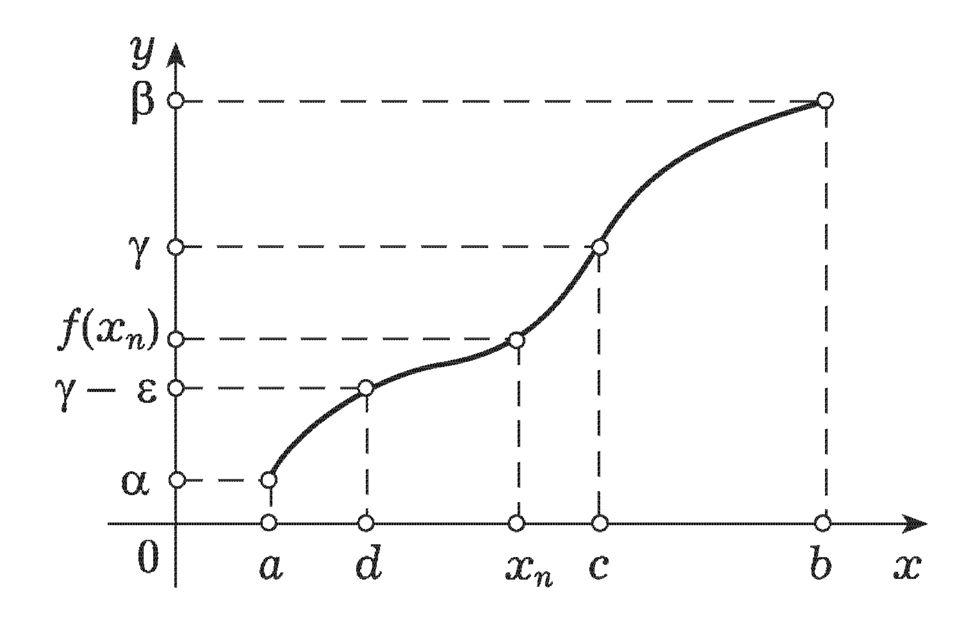


Рис. 4.8

[1] Так как все x_n меньше c и, стало быть, принадлежат $\{x\}$.

[2] В силу того, что $x'_n < c < x''_n$ для любого n.

$f(d) = \gamma - \varepsilon$ и $f(c) = \gamma$, то из последних неравенств вытекает, что при $n \geqslant N$
$$0 < \gamma - f(x_n) < \varepsilon,$$
т. е. последовательность $\{f(x_n)\}$ сходится к γ, а поскольку $\{x_n\}$ — произвольная сходящаяся к c слева последовательность значений аргумента, то тем самым доказано, что левое предельное значение в точке c существует и равно $\gamma = f(c)$ [1]. Если $a \leqslant c < b$, то, рассуждая аналогично, можно доказать, что $\gamma = f(c)$ является правым предельным значением функции в точке c. Мы доказали, что правое и левое предельные значения функции $y = f(x)$ в любой внутренней точке c равны частному ее значению $f(c)$, а это, в силу замечания в п. 1 § 2, означает непрерывность $f(x)$ во внутренних точках сегмента. Непрерывность этой функции в граничных точках сегмента следует из того, что соответствующие односторонние предельные значения $f(x)$ в граничных точках сегмента равны частным значениям функции. Лемма полностью доказана.

Следствие. *Пусть на сегменте $[a, b]$ задана строго монотонная непрерывная функция $y = f(x)$, и пусть $\alpha = f(a)$, $\beta = f(b)$. Тогда эта функция имеет на сегменте $[\alpha, \beta]$ (или $[\beta, \alpha]$, если $\beta < \alpha$) строго монотонную и непрерывную обратную функцию $x = f^{-1}(y)$.*

Доказательство. В силу только что доказанной леммы множеством значений функции $y = f(x)$ является сегмент $[\alpha, \beta]$, а тогда, согласно замечанию 1 этого пункта, на сегменте $[\alpha, \beta]$ существует обратная строго монотонная функция $x = f^{-1}(y)$, множеством значений которой является сегмент $[a, b]$ и которая поэтому, в силу той же самой леммы, непрерывна на сегменте $[\alpha, \beta]$.

Замечание 2. Отметим, что монотонные функции имеют правое и левое предельные значения в каждой внутренней точке области задания. Доказательство этого предложения предоставляем читателю.

§ 5. Простейшие элементарные функции

Простейшими элементарными функциями обычно называют следующие функции: $y = x^\alpha$, $y = a^x$, $y = \log_a x$, $y = \sin x$, $y = \cos x$, $y = \operatorname{tg} x$, $y = \operatorname{ctg} x$, $y = \arcsin x$, $y = \arccos x$, $y = \operatorname{arctg} x$, $y = \operatorname{arcctg} x$.

Из элементарного курса читатель имеет представление об этих функциях и об их графиках. Некоторые из этих функций,

[1] Мы рассмотрели случай столь малого $\varepsilon > 0$, что $\alpha < \gamma - \varepsilon$. Если $\alpha \geqslant \gamma - \varepsilon$, то достаточно положить $d = a$ и повторить проведенные рассуждения, используя очевидное неравенство $\gamma - \varepsilon \leqslant f(d)$.

например $y = a^x$, без труда определяются для рациональных значений аргумента x. Мы выясним вопрос об определении простейших элементарных функций для всевозможных вещественных значений их аргументов. Этот вопрос не является простым: неясно, например, как возвести произвольное вещественное число x в произвольную вещественную степень α.

Мы изучим также вопрос о непрерывности простейших элементарных функций во всех точках области их задания. Нами будет обосновано то поведение простейших элементарных функций, которое наглядно вырисовывается из рассмотрения их графиков.

В дополнении к гл. 8 приводятся алгоритмы вычисления значений простейших элементарных функций.

1. Рациональные степени положительных чисел. Возведение любого вещественного числа x *в целую положительную степень* n определяется как n-кратное умножение числа x самого на себя. Следовательно, при целом n мы можем считать определенной степенную функцию $y = x^n$ для всех вещественных значений x. Некоторые свойства этой функции будут нами использованы для определения рациональных степеней положительных чисел.

Докажем следующую лемму.

Лемма 2. *Степенная функция $y = x^n$ при $x \geqslant 0$ и целом положительном n возрастает и непрерывна.*

Доказательство. Докажем возрастание этой функции. Пусть $0 \leqslant x_1 < x_2$. Так как $x_2^n - x_1^n = (x_2 - x_1)\times \times(x_2^{n-1} + x_2^{n-2}x_1 + \ldots + x_1^{n-1})$, $x_2^{n-1} + x_2^{n-2}x_1 + \ldots + x_1^{n-1} > 0$, то $x_2^n > x_1^n$. Непрерывность этой функции была нами установлена ранее (см. пример 1 п. 1 § 3).

Следствие. Рассмотрим степенную функцию $y = x^n$ на сегменте $[0, N]$, где N — любое положительное число. Так как эта функция непрерывна и возрастает на указанном сегменте, то она имеет в силу следствия из леммы 1 этой главы на сегменте $[0, N^n]$ возрастающую и непрерывную обратную функцию, которую мы обозначим через $y^{1/n}$.

Поскольку N можно выбрать как угодно большим, то и N^n также будет сколь угодно большим. Следовательно, функция $x = y^{1/n}$ определена для всех неотрицательных значений y. Меняя для этой функции обозначение аргумента y на x, а обозначение функции x на y, мы получим степенную функцию $y = x^{1/n}$, определенную для всех неотрицательных значений x.

Определим $a^{1/n}$ как число b, равное значению функции $y = x^{1/n}$ в точке a. Мы можем теперь определить любую рацио-

нальную степень r положительного числа a. Именно, если $r = m/n$, где m и n – целые положительные числа, то мы положим

$$a^r = a^{m/n} = (a^{1/n})^m.$$

Договоримся, кроме того, что

$$a^0 = 1, \qquad a^{-r} = (1/a)^r.$$

Нетрудно убедиться в справедливости следующих свойств рациональной степени положительных чисел:

$$(a^r)^s = a^{r\cdot s}, \quad a^r \cdot b^r = (a\cdot b)^r, \quad a^r \cdot a^s = a^{r+s}. \qquad (*)$$

Докажем сначала справедливость первого свойства $(*)$. Заметим, что при целом положительном p равенство $(a^{m/n})^p = a^{m\cdot p/n}$, в котором под m и n понимаются любые целые положительные числа, заведомо справедливо, ибо как левая, так и правая части этого равенства равны произведению числа $a^{1/n}$ самого на себя $m \cdot p$ раз.

Полагая $r = \dfrac{m_1}{n_1}$, $s = \dfrac{m_2}{n_2}$, докажем равенство $(a^r)^s = a^{r\cdot s}$ в ситуации любых положительных рациональных r и s. Положим $c_1 = \left(a^{\frac{m_1}{n_1}}\right)^{\frac{m_2}{n_2}}$, $c_2 = a^{\frac{m_1\cdot m_2}{n_1\cdot n_2}}$. Если бы c_1 было отлично от c_2, то из возрастания степенной функции $y = x^{n_2}$ следовало бы, что и $c_1^{n_2} \neq c_2^{n_2}$, а последнее соотношение, в силу уже доказанной справедливости равенства $(a^{m/n})^p = a^{m\cdot p/n}$ при целом p, означало бы, что $(a^{m_1/n_1})^{m_2} \neq a^{m_1\cdot m_2/n_1}$. Полученное соотношение противоречит уже доказанному нами для целых положительных m_1, n_1 и m_2 равенству $(a^{m_1/n_1})^{m_2} = a^{m_1\cdot m_2/n_1}$. Тем самым, $c_1 = c_2$ и первое равенство $(*)$ доказано для любых положительных рациональных r и s.

Распространение этого равенства на неположительные r и s не представляет труда в силу нашей договоренности о том, что

$$a^0 = 1, \quad a^{-r} = \left(\frac{1}{a}\right)^r \quad \text{при} \quad r > 0.$$

Второе равенство $(*)$ также достаточно доказать для положительного рационального r. Полагая это r равным m/n, где m и n — целые положительные числа, заметим, что нам достаточно доказать равенство $a^{1/n} \cdot b^{1/n} = (a\cdot b)^{1/n}$, ибо перемножением m таких равенств будет доказано общее соотношение $a^r \cdot b^r = (a\cdot b)^r$.

Для доказательства равенства $a^{1/n}\cdot b^{1/n} = (a\cdot b)^{1/n}$ заметим, что в силу свойств взаимно обратных функций $y = x^{1/n}$ и $x = y^n$ можно утверждать, что $(b^{1/n})^n = b$, $(a^{1/n})^n = a$, $\left((a\cdot b)^{1/n}\right)^n = a\cdot b$. Поэтому, положив $c_1 = a^{1/n}\cdot b^{1/n}$, $c_2 = (a\cdot b)^{1/n}$ и предполагая, что $c_1 \neq c_2$, мы получили бы, что $c_1^n \neq c_2^n$, что противоречит равенству $a\cdot b = ab$.

Докажем теперь последнее свойство $(*)$, учитывая, что первые два уже доказаны. Пусть $r = m_1/n_1$, $s = m_2/n_2$, тогда $r = m_1n_2/(n_1n_2)$, $s = m_2 \cdot n_1/(n_2\cdot n_1)$, и мы приходим к следующему равенству:

$$a^r \cdot a^s = \left(a^{\frac{1}{n_1n_2}}\right)^{m_1\cdot n_2} \cdot \left(a^{\frac{1}{n_1n_2}}\right)^{m_2\cdot n_1} = \left(a^{\frac{1}{n_1n_2}}\right)^{m_1n_2+m_2n_1}.$$

Последнее равенство справедливо, так как $m_1\cdot n_2$ и $m_2\cdot n_1$ — целые числа.

Таким образом,

$$a^r \cdot a^s = a^{\frac{(m_1 n_2 + m_2 n_1)}{n_1 n_2}} = a^{\frac{m_1}{n_1} + \frac{m_2}{n_2}} = a^{r+s},$$

что и требовалось.

Докажем, что при $a > 1$ и рациональном $r > 0$ справедливо неравенство $a^r > 1$. В самом деле, пусть $r = m/n$ и $a^r = a^{m/n} \leqslant 1$. Перемножая почленно n указанных неравенств, получим $a^m \leqslant 1$. Последнее неравенство противоречит неравенству $a^m > 1$, полученному почленным перемножением m неравенств вида $a > 1$. Отметим, наконец, что если рациональная дробь $r = m/n$ имеет нечетный знаменатель n, то определение рациональной степени можно распространить и на отрицательные числа, полагая

$$(-a)^r = a^r, \text{ если } m \text{ — четное,}$$
$$(-a)^r = -a^r, \text{ если } m \text{ — нечетное.}$$

2. Показательная функция. Из рассуждений предыдущего пункта вытекает, что если a — положительное число, то функция $y = a^x$ определена для всех рациональных x.

Легко убедиться в том, что функция $y = a^x$, $a > 1$, определенная на множестве $\{x\}$ всех рациональных чисел, монотонно возрастает на этом множестве.

В самом деле, пусть x_1 и x_2 — любые два рациональных числа, удовлетворяющие условию $x_2 > x_1$. Тогда

$$a^{x_2} - a^{x_1} = a^{x_1}(a^{x_2 - x_1} - 1).$$

Так как $x_2 - x_1 > 0$ и $a > 1$, то $a^{x_2 - x_1} > 1$, т. е. правая часть последнего равенства положительна, и поэтому $a^{x_2} > a^{x_1}$. Возрастание функции a^x на множестве рациональных чисел доказано.

Переходим к определению функции a^x *на множестве всех вещественных чисел.*

Фиксируем *произвольное вещественное число* x и рассмотрим всевозможные рациональные числа α и β, удовлетворяющие неравенствам

$$\alpha < x < \beta. \tag{4.2}$$

Определим a^x при $a > 1$ как вещественное число y, удовлетворяющее неравенствам

$$a^\alpha \leqslant y \leqslant a^\beta. \tag{4.3}$$

Ниже мы докажем, что такое число y *существует, и притом только одно.* Мы докажем также, что определенная нами функция $y = a^x$ обладает следующими важными свойствами: 1) *возрастает на всей бесконечной прямой,* 2) *непрерывна в любой точке x этой прямой.*

1°. Прежде всего докажем, что для любого фиксированного x и любых рациональных чисел α и β, удовлетворяющих неравенствам (4.2), *существует вещественное число y, удовлетворяющее неравенствам* (4.3).

Фиксируем произвольное рациональное число β, удовлетворяющее правому неравенству (4.2), и рассмотрим всевозможные рациональные числа α, удовлетворяющие левому неравенству (4.2).

Так как $\alpha < \beta$ и показательная функция, определенная на множестве рациональных чисел, возрастает, то $a^\alpha < a^\beta$. Таким образом, множество $\{a^\alpha\}$ ограничено сверху и число a^β является одной из верхних граней этого множества. Стало быть, это множество имеет точную верхнюю грань, которую мы обозначим через y. Остается доказать, что y удовлетворяет неравенствам (4.3). Из определения точной верхней грани вытекает справедливость левого неравенства (4.3), а справедливость правого неравенства (4.3) вытекает из того, что a^β — одна из верхних граней, а y — точная верхняя грань множества $\{a^\alpha\}$.

2°. Установим теперь, что существует *только одно вещественное число y, удовлетворяющее неравенствам* (4.3).

Достаточно доказать, что для любого $\varepsilon > 0$ найдутся такие рациональные числа α и β, удовлетворяющие неравенствам (4.2), для которых $a^\beta - a^\alpha < \varepsilon$. В самом деле, тогда любые два числа y_1 и y_2, удовлетворяющие неравенствам (4.3), обязаны совпадать, ибо разность между ними по модулю меньше любого наперед взятого положительного числа ε.

Фиксируем произвольное $\varepsilon > 0$ и некоторое рациональное β_0, удовлетворяющее правому неравенству (4.2). Тогда, так как $a^\alpha < a^{\beta_0}$, получим

$$a^\beta - a^\alpha = a^\alpha(a^{\beta-\alpha} - 1) < a^{\beta_0}(a^{\beta-\alpha} - 1).$$

Неравенство $a^\beta - a^\alpha < \varepsilon$ будет доказано, если мы установим возможность выбора таких α и β, что $a^{\beta-\alpha} - 1 < \dfrac{\varepsilon}{a^{\beta_0}}$.

Из гл. 2 вытекает, что для любого натурального n можно выбрать рациональные числа α и β, удовлетворяющие неравенствам (4.2), так что разность $\beta - \alpha$ будет меньше $1/n$. Таким образом, достаточно доказать существование такого натурального n, для которого

$$a^{1/n} - 1 < \frac{\varepsilon}{a^{\beta_0}}. \tag{4.4}$$

Убедимся в возможности выбора такого натурального n. Пусть

$$a^{1/n} = 1 + \delta_n.$$

Так как $a^{1/n} > 1$, то δ_n положительно. Используя формулу бинома Ньютона, будем иметь $a = \left(a^{1/n}\right)^n = (1+\delta_n)^n = 1 + n\delta_n +$ (положительные члены)$> 1 + n\delta_n$. Отсюда $a - 1 > n\delta_n$ и $0 < \delta_n < \dfrac{a-1}{n}$. Стало быть, $a^{1/n} - 1 = \delta_n < \dfrac{a-1}{n}$. Неравенство (4.4) будет справедливо, если мы выберем n удовлетворяющим требованию $\dfrac{a-1}{n} < \dfrac{\varepsilon}{a^{\beta_0}}$ или $n > \dfrac{(a-1)a^{\beta_0}}{\varepsilon}$. Доказательство однозначной определенности числа y, удовлетворяющего неравенствам (4.3), завершено.

Заметим, что если x — рациональное число и a^x — значение в точке x показательной функции, первоначально определенной лишь на множестве

рациональных чисел, то a^x и является тем единственным вещественным числом y, которое удовлетворяет неравенствам (4.3).

3°. Докажем теперь, что построенная нами функция a^x (при $a > 1$) *возрастает на всей бесконечной прямой.*

Пусть x_1 и x_2 — любые вещественные числа, удовлетворяющие неравенству $x_1 < x_2$. Очевидно, найдутся рациональные числа α и β, удовлетворяющие неравенствам $x_1 < \alpha < \beta < x_2$ (см. утверждение, доказанное в конце п. 1 § 2 гл. 2). Из определения показательной функции и из возрастания ее на множестве рациональных чисел вытекают неравенства $a^{x_1} \leqslant a^\alpha < a^\beta \leqslant \leqslant a^{x_2}$, т. е. $a^{x_1} < a^{x_2}$. Возрастание функции a^x доказано.

4°. Остается доказать *непрерывность* построенной нами функции a^x *в любой точке* x бесконечной прямой.

Пусть $\{x_n\}$ — любая сходящаяся к x последовательность вещественных чисел. Достаточно доказать, что для любого $\varepsilon > 0$ найдется номер N такой, что при $n \geqslant N$ справедливо неравенство $|a^{x_n} - a^x| < \varepsilon$.

Фиксируем произвольное $\varepsilon > 0$ и выберем рациональные числа α и β, удовлетворяющие неравенствам (4.2), так, чтобы было справедливо неравенство $a^\beta - a^\alpha < \varepsilon$ (возможность выбора таких α и β доказана в 2°). Так как последовательность $\{x_n\}$ сходится к x и $\alpha < x < \beta$, то найдется номер N такой, что при $n \geqslant N$ справедливы неравенства $\alpha < x_n < \beta$. Из неравенств $\alpha < x < \beta$ и $\alpha < x_n < \beta$ и из свойства монотонности показательной функции вытекает, что $a^\alpha < a^{x_n} < a^\beta$ и $a^\alpha < a^x < a^\beta$ (при $n \geqslant N$). Так как разность между числами a^β и a^α меньше ε и оба числа a^x и a^{x_n} заключены между a^α и a^β, то $|a^{x_n} - a^x| < \varepsilon$ (при $n \geqslant N$). Доказательство непрерывности завершено.

З а м е ч а н и е 1. Если $0 < a < 1$, то $a = 1/b$, где $b > 1$. Поэтому функцию $y = a$ при $0 < a < 1$ можно определить как функцию $y = b^{-x}$, $b > 1$.

Установим некоторые свойства показательной функции $y = = a^x$, $a > 1$.

1. Все значения показательной функции положительны. Действительно, пусть x — произвольная точка числовой прямой, а x' — рациональная точка, такая, что $x' < x$. Так как, по определению, $a^{x'} > 0$ и $a^{x'} < a^x$, то $a^x > 0$.

2. $\lim\limits_{x\to-\infty} a^x = 0$, $\lim\limits_{x\to+\infty} a^x = +\infty$.

В самом деле, так как $a > 1$, то $a = 1 + \alpha$, где $\alpha > 0$ и $a^n = = (1+\alpha)^n > 1 + n\alpha$. Следовательно, $\lim\limits_{n\to+\infty} a^n = +\infty$. В силу монотонности функции $\lim\limits_{x\to+\infty} a^x = +\infty$. Так как $a^{-n} = 1/a^n$, то $\lim\limits_{n\to\infty} a^{-n} = 0$, и поэтому $\lim\limits_{x\to-\infty} a^x = 0$.

3. Из свойств 1 и 2, а также из монотонности и непрерывности функции $y=a^x$ вытекает, в силу леммы 1, что *значения y этой функции заполняют всю положительную полупрямую $y > 0$.*

4. Для любых вещественных чисел x_1 и x_2 справедливы соотношения

$$(a^{x_1})^{x_2} = a^{x_1 x_2}, \quad a^{x_1} b^{x_1} = (a \cdot b)^{x_1}, \quad a^{x_1} a^{x_2} = a^{x_1 + x_2}.$$

Действительно, мы уже отмечали справедливость этих соотношений для рациональных показателей. Чтобы убедиться в справедливости этих соотношений для любых показателей, достаточно рассмотреть последовательности $\{x'_n\}$ и $\{x''_n\}$ рациональных чисел, сходящиеся соответственно к x_1 и x_2. Тогда, например, $a^{x'_n}a^{x''_n} = a^{x'_n+x''_n}$. Переходя к пределу при $n \to \infty$ и используя свойство непрерывности показательной функции, мы получим $a^{x_1}a^{x_2} = a^{x_1+x_2}$. Аналогично можно убедиться в справедливости и других из перечисленных выше соотношений.

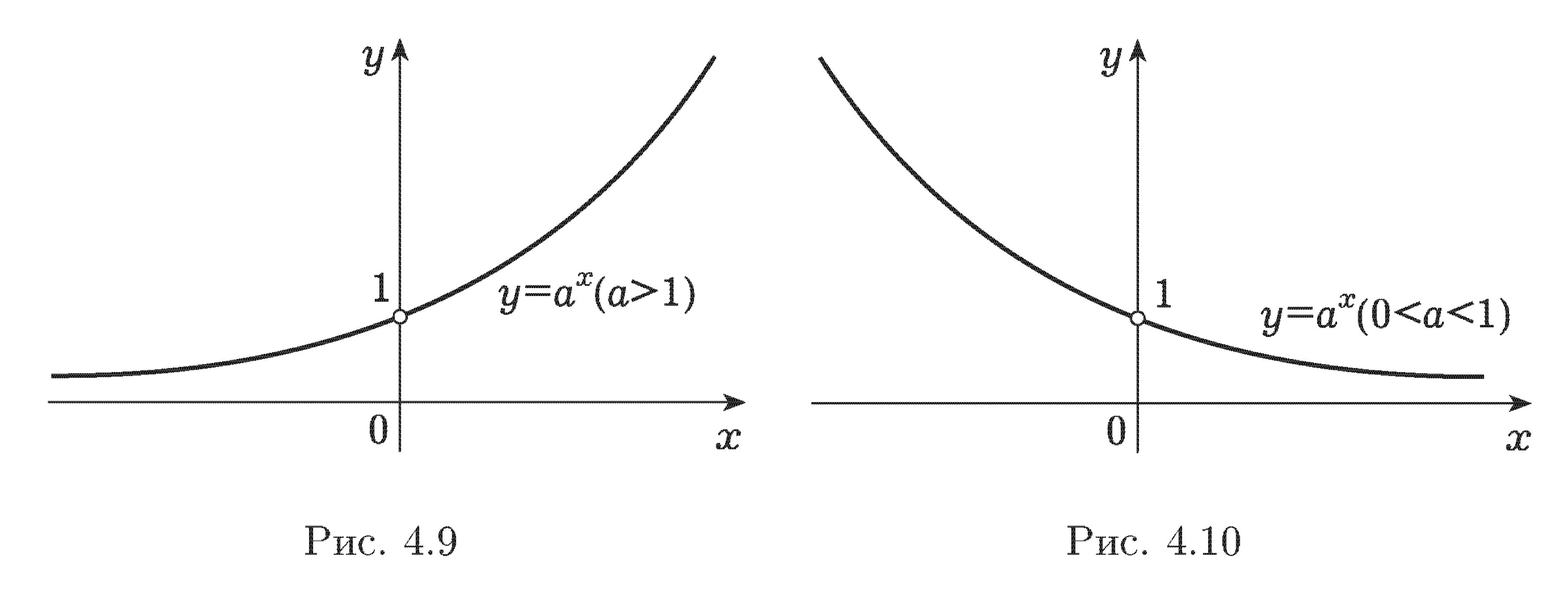


Рис. 4.9 Рис. 4.10

Замечание 2. Мы установили свойства 1–4 показательной функции $y = a^x$, а также непрерывность и монотонное возрастание этой функции на бесконечной прямой для случая $a > 1$. Отметим, что при $0 < a < 1$ функция $y = a^x$, в силу замечания 1, непрерывна и монотонно убывает на бесконечной прямой. Кроме того, для этой функции сохраняются свойства 1, 3 и 4, а свойство 2 модифицируется следующим образом:

$$\lim_{x\to-\infty} a^x = +\infty, \qquad \lim_{x\to+\infty} a^x = 0.$$

На рисунках 4.9 и 4.10 изображены графики показательной функции $y = a^x$ для случаев $a > 1$ и $0 < a < 1$.

Замечание 3. Свойство $a^{x_1+x_2} = a^{x_1}a^{x_2}$ может быть положено в основу функционального определения показательной функции $y = a^x$. Можно доказать, что существует, и притом единственная, функция $f(x)$, определенная на всей бесконечной прямой и удовлетворяющая следующим трем требованиям:

1) для любых вещественных x_1 и x_2 соотношению $f(x_1+x_2) = f(x_1)f(x_2)$;

2) соотношениям $f(0) = 1$, $f(1) = a$, где $a > 0$;

3) непрерывная при $x = 0$.

Такой функцией и является построенная выше функция a^x.

3. Логарифмическая функция. Рассмотрим *произвольный сегмент* $[c, d]$ бесконечной прямой. На этом сегменте функция $y = a^x$ строго монотонна и непрерывна. Поэтому, в силу

следствия из леммы 1, функция $y = f(x) = a^x$ имеет на сегменте $[\alpha, \beta]$, где $\alpha = a^c$, $\beta = a^d$, обратную функцию $x = f^{-1}(y)$, которую мы будем называть *логарифмической*. Логарифмическая функция обозначается следующим образом:

$$x = \log_a y.$$

Меняя для этой функции обозначение аргумента y на x, а обозначение функции x на y, мы получим функцию

$$y = \log_a x.$$

Отметим следующие свойства логарифмической функции, непосредственно вытекающие из ее определения:

1°. Логарифмическая функция определена для всех положительных значений x. Это следует из того, что ее аргумент представляет собой значения показательной функции, которые, в силу свойств 1 и 3 этой функции (см. предыдущий пункт), только положительны и заполняют всю положительную полупрямую $x > 0$.

2°. Логарифмическая функция непрерывна и возрастает на всей открытой полупрямой $x > 0$ при $a > 1$ (убывает при $a < 1$), причем при $a > 1$

$$\lim_{x \to 0+0} \log_a x = -\infty, \qquad \lim_{x \to +\infty} \log_a x = +\infty.$$

Справедливость этого свойства вытекает из свойств показательной функции и из замечания 1 п. 2 § 4.

3°. Для любых положительных x_1 и x_2

$$\log_a (x_1 \cdot x_2) = \log_a x_1 + \log_a x_2.$$

Это свойство также вытекает из свойств показательной функции.

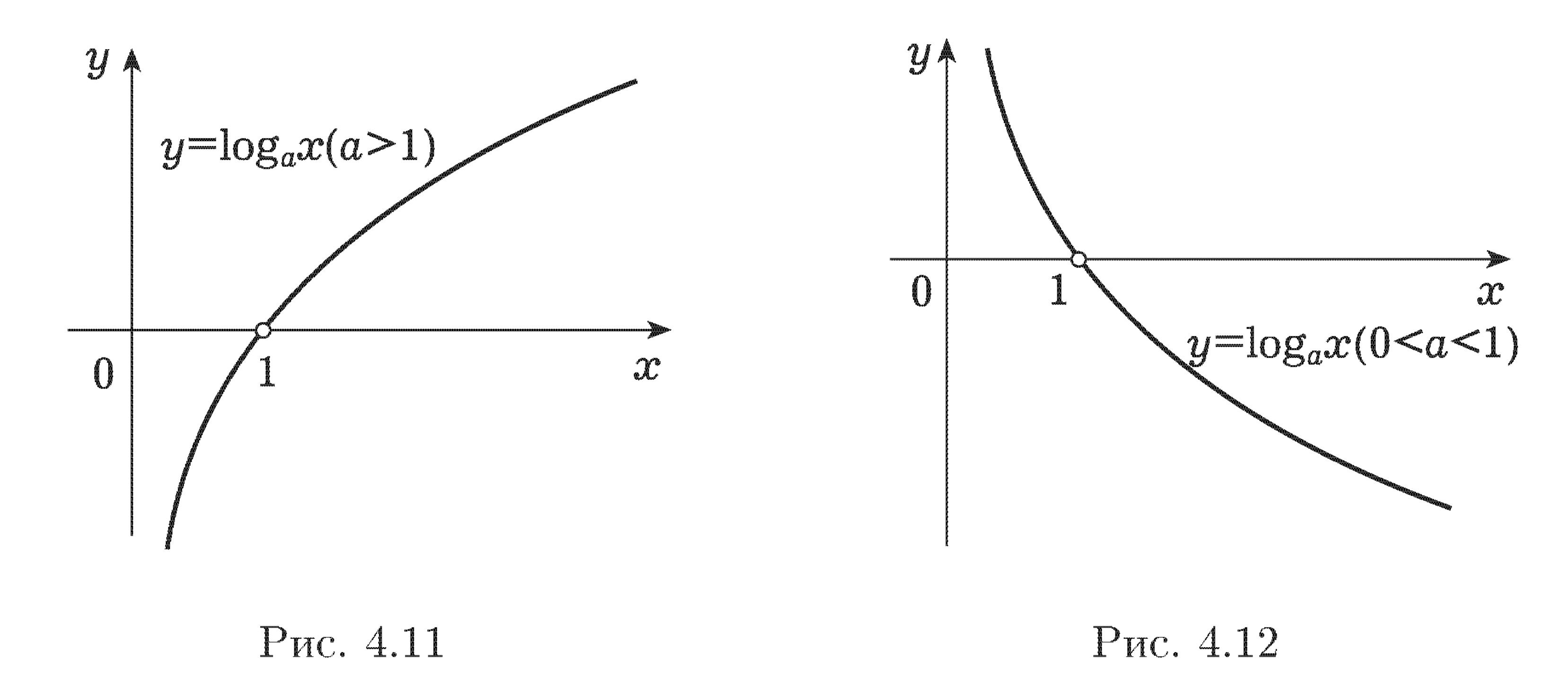


Рис. 4.11 Рис. 4.12

З а м е ч а н и е. Следует особо отметить логарифмическую функцию $y = \log_e x$, где $e = \lim\limits_{n \to \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$. Мы будем для этой функции использовать обозначение $y = \ln x$. Подчеркнем, что

логарифмическая функция $y = \ln x$ играет важную роль в математике и ее приложениях. Логарифмы по основанию e принято называть *натуральными*.

На рисунках 4.11 и 4.12 изображены графики логарифмической функции $y = \log_a x$ для случаев $a > 1$ и $0 < a < 1$.

4. Гиперболические функции. Гиперболическими функциями называются следующие функции [1]:

1°. Гиперболический синус

$$\operatorname{sh} x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}.$$

2°. Гиперболический косинус

$$\operatorname{ch} x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}.$$

3°. Гиперболический тангенс

$$\operatorname{th} x = \frac{\operatorname{sh} x}{\operatorname{ch} x} = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}.$$

4°. Гиперболический котангенс

$$\operatorname{cth} x = \frac{\operatorname{ch} x}{\operatorname{sh} x} = \frac{e^x + e^{-x}}{e^x - e^{-x}}.$$

Из определения гиперболических функций следует, что гиперболический синус, гиперболический косинус и гиперболический тангенс заданы на всей числовой прямой. Гиперболический котангенс определен всюду на числовой прямой, за исключением точки $x = 0$.

Гиперболические функции непрерывны в каждой точке области задания (это вытекает из непрерывности показательной функции и теоремы 4.2).

Гиперболические функции обладают рядом свойств, аналогичных свойствам тригонометрических функций. Например, для гиперболических функций имеют место теоремы сложения, аналогичные теоремам сложения для тригонометрических функций. Именно:

$$\operatorname{sh}(x + y) = \operatorname{sh} x \operatorname{ch} y + \operatorname{ch} x \operatorname{sh} y,$$
$$\operatorname{ch}(x + y) = \operatorname{ch} x \operatorname{ch} y + \operatorname{sh} x \operatorname{sh} y.$$

На рисунках 4.13–4.16 изображены графики гиперболических функций.

[1] Наименование «гиперболические функции» объясняется тем, что геометрически функции $y = \operatorname{sh} x$ и $y = \operatorname{ch} x$ могут быть определены из рассмотрения равнобочной гиперболы по тем же правилам, по которым функции $y = \sin x$ и $y = \cos x$ могут быть определены из рассмотрения единичной окружности.

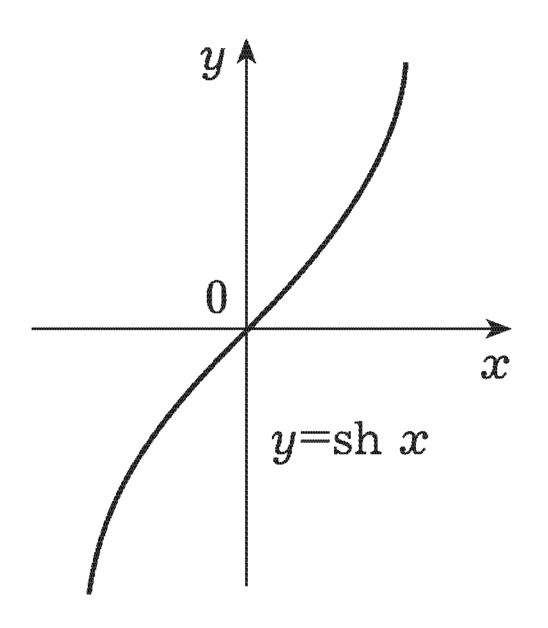


Рис. 4.13

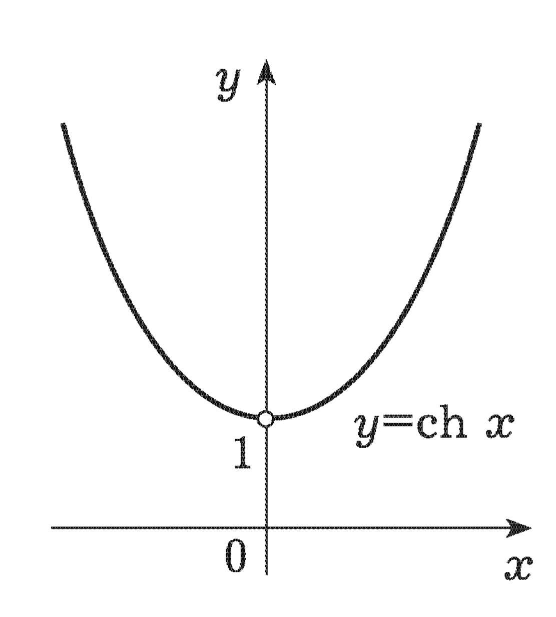


Рис. 4.14

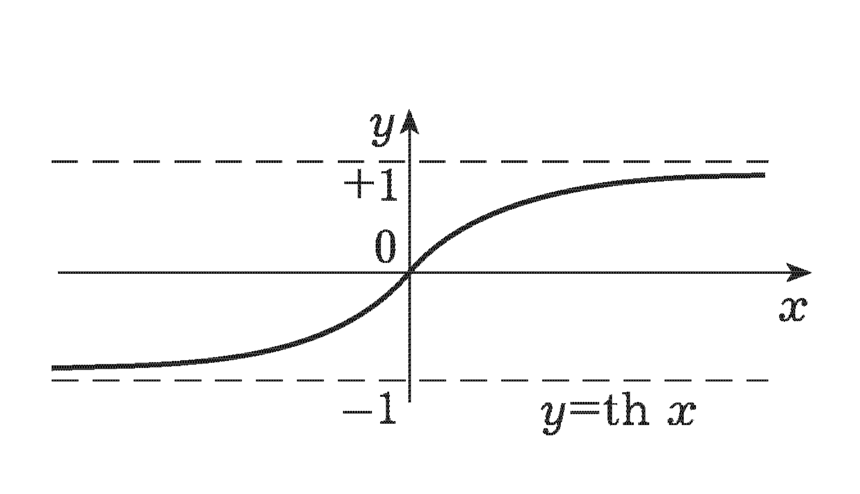


Рис. 4.15

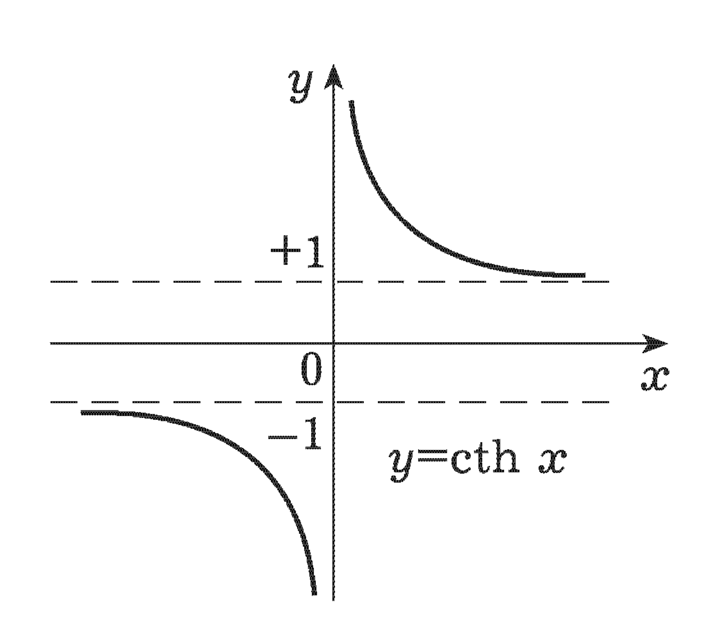


Рис. 4.16

5. Степенная функция с любым вещественным показателем α. Пусть α — произвольное вещественное число. Определим общую *степенную функцию* $y = x^\alpha$, $x > 0$, следующим образом:

$$y = x^\alpha = \left(a^{\log_a x}\right)^\alpha = a^{\alpha \log_a x} \quad (a > 1).$$

Из определения степенной функции следует, что при $\alpha > 0$ она представляет собой возрастающую, а при $\alpha < 0$ убывающую функцию.

Рассмотрим предельное значение степенной функции при $x \to 0+0$. Докажем, что

$$\lim_{x \to 0+0} x^\alpha = \begin{cases} 0 & \text{при} \quad \alpha > 0, \\ +\infty & \text{при} \quad \alpha < 0. \end{cases}$$

Действительно, пусть $\{x_n\}$ — любая сходящаяся к нулю справа последовательность значений аргумента x. Так как $\lim\limits_{n \to \infty} \log_a x_n = -\infty$, то из свойств показательной функции вы-

текает, что $\lim\limits_{n\to\infty} a^{\alpha\log_a x_n} = 0$ при $\alpha > 0$ и $\lim\limits_{n\to\infty} a^{\alpha\log_a x_n} = +\infty$ при $\alpha < 0$. Естественно положить теперь $0^\alpha = 0$ при $\alpha > 0$ и считать это выражение неопределенным при $\alpha \leqslant 0$.

Докажем *непрерывность* степенной функции в любой точке x положительной бесконечной полупрямой ($x > 0$). Для этого достаточно установить, что эта функция непрерывна в каждой точке x указанной полупрямой слева и справа (см. замечание в п. 1 § 3). Докажем, например, непрерывность этой функции в точке x слева (непрерывность справа доказывается аналогично). При этом ради определенности будем считать $\alpha > 0$. Обратимся к формуле $y = x^\alpha = a^{\alpha\log_a x}$, $a > 1$. Пусть $\{x_n\}$ — любая сходящаяся слева к x последовательность значений аргумента степенной функции, так что $x_n < x$. Так как логарифмическая функция непрерывна, то последовательность $\{u_n\}$, где $u_n = \alpha\log_a x_n$,

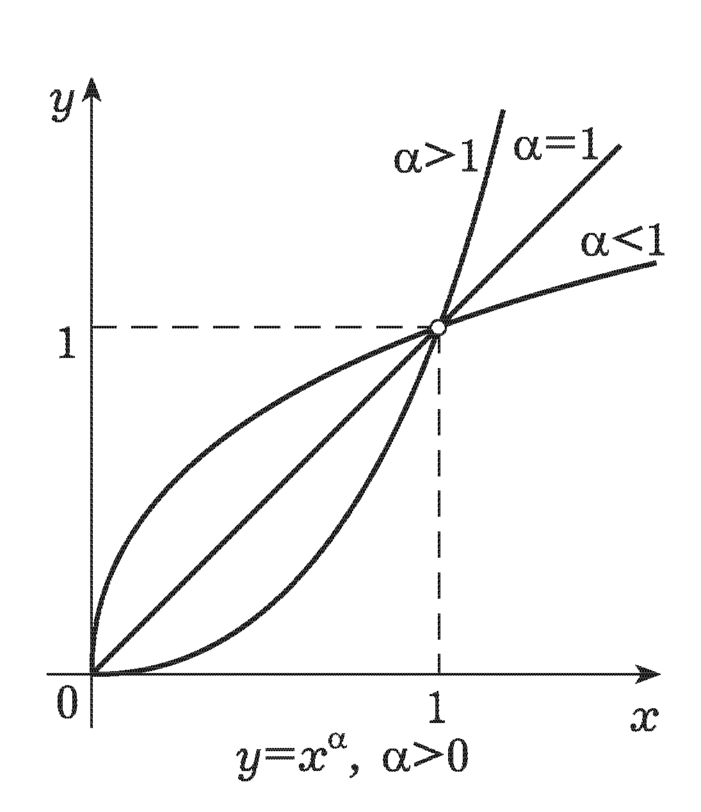


Рис. 4.17

y=x^α, α<0

Рис. 4.18

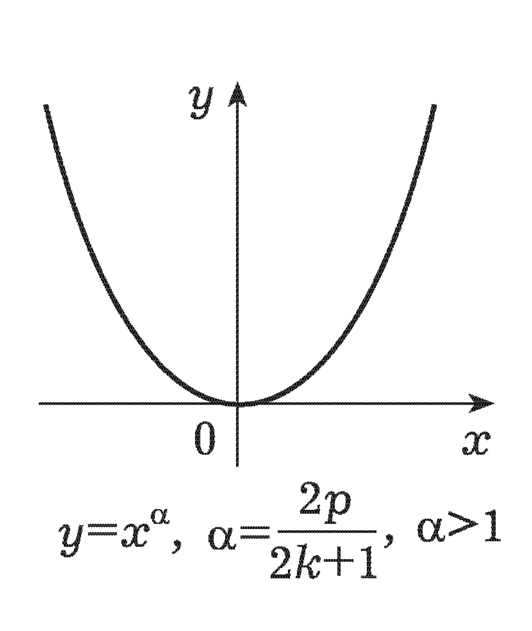


Рис. 4.19

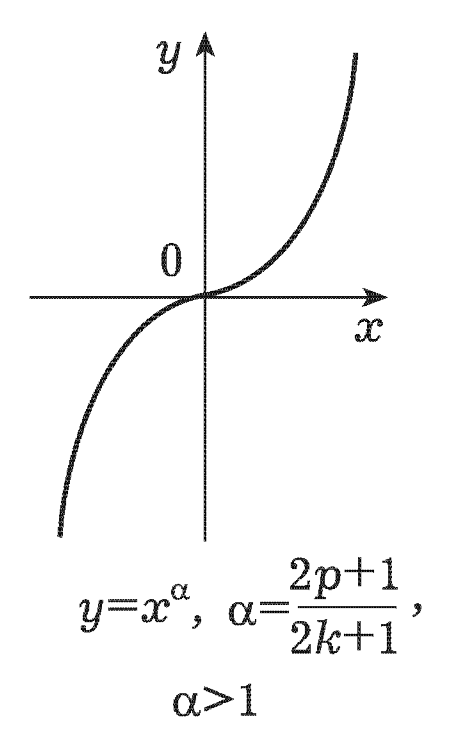


Рис. 4.20

сходится к $u = \alpha \log_a x$, причем все элементы u_n отличны от u (в самом деле, поскольку при $a > 1$ логарифмическая функция возрастает, то справедливо неравенство $u_n < u$). В силу непрерывности показательной функции последовательность $\{a_n^u\}$ сходится к a^u. Иными словами, последовательность $\{a^{\alpha \log_a x_n}\}$, представляющая собой последовательность $\{x_n^\alpha\}$ значений степенной функции, соответствующую последовательности $\{x_n\}$, сходится к $a^{\alpha \log_a x}$, т. е. к x^α. Непрерывность степенной функции в точке $x > 0$ слева доказана. Аналогично доказывается непрерывность этой функции в точке $x > 0$ справа. Но непрерывность функции в точке x слева и справа означает, что функция непрерывна в этой точке. Отметим, что если $\alpha > 0$, то степенная функция $y = x^\alpha$ непрерывна также и в точке $x = 0$.

Замечание. Отметим, что если показатель α степенной функции представляет собой рациональное число m/n, где n — нечетное целое число, то степенную функцию $y = x^\alpha$ можно определить на всей числовой оси, полагая для $x < 0$

$$y = |x|^\alpha, \quad \text{если } \alpha = m/n \text{ и } m \text{ — четное,}$$
$$y = -|x|^\alpha, \quad \text{если } \alpha = m/n \text{ и } m \text{ — нечетное.}$$

На рисунках 4.17–4.20 изображены графики степенной функции $y = x^\alpha$ для различных значений α.

6. Тригонометрические функции. В курсе элементарной математики с помощью наглядных геометрических соображений были введены тригонометрические функции $y = \sin x$ и $y = \cos x$ [1]).

Перечислим некоторые важные для дальнейшего свойства тригонометрических функций:

1°. При любых вещественных x', x'' и x справедливы следующие соотношения:

$$\begin{gathered} \sin(x' + x'') = \sin x' \cos x'' + \cos x' \sin x'', \\ \cos(x' + x'') = \cos x' \cos x'' - \sin x' \sin x'', \\ \sin^2 x + \cos^2 x = 1. \end{gathered} \tag{4.5}$$

[1]) Остальные тригонометрические функции $y = \operatorname{tg} x$, $y = \operatorname{ctg} x$, $y = \sec x$ и $y = \operatorname{cosec} x$ определяются через указанные:

$$\operatorname{tg} x = \frac{\sin x}{\cos x}, \quad \operatorname{ctg} x = \frac{\cos x}{\sin x}, \quad \sec x = \frac{1}{\cos x}, \quad \operatorname{cosec} x = \frac{1}{\sin x}.$$

Подчеркнем, что определение функций $\sin x$ и $\cos x$ с помощью наглядных геометрических соображений не является логически безупречным, ибо при этом возможность определить эти функции для всех вещественных значений аргумента x сводится к возможности установления взаимно однозначного соответствия между всеми точками единичной окружности и всеми вещественными числами из сегмента $[0, 2\pi]$.

2°.

$$\begin{aligned} \sin 0 = 0, \quad \cos 0 = 1, \\ \sin \frac{\pi}{2} = 1, \quad \cos \frac{\pi}{2} = 0. \end{aligned} \tag{4.6}$$

3°. Если $0 < x < \frac{\pi}{2}$, то

$$0 < \sin x < x. \tag{4.7}$$

Указанные свойства устанавливаются посредством геометрических рассуждений. Мы не будем давать здесь известные из курса элементарной математики геометрические выводы свойств 1° и 2°. Остановимся лишь на *геометрическом выводе* неравенств (4.7). Кроме неравенства (4.7), мы установим неравенство $x < \operatorname{tg} x$ (при $0 < x < \frac{\pi}{2}$).

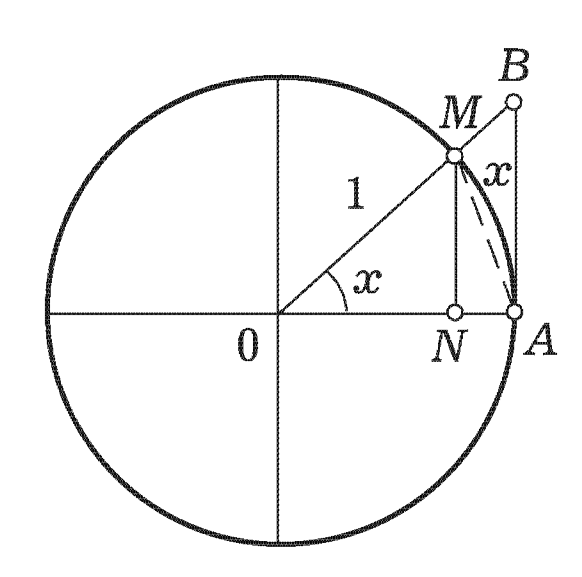


Рис. 4.21

Рассмотрим окружность радиуса 1 с центром в точке O и точку A на этой окружности (рис. 4.21). От точки A против часовой стрелки будем отсчитывать дуги окружности. Пусть M — точка окружности, находящаяся в первой четверти, и x — длина дуги $\overset{\frown}{AM}$, $0 < x < \frac{\pi}{2}$ (x — радианная мера угла AOM), N — основание перпендикуляра, опущенного из M на OA, B — точка пересечения перпендикуляра к OA, восстановленного из точки A, с продолжением отрезка OM. Тогда $MN = \sin x$, $ON = \cos x$, $AB = \operatorname{tg} x$. Так как треугольник OMA содержится в секторе OMA, который в свою очередь содержится в треугольнике OBA, и площади перечисленных фигур соответственно равны $\frac{1}{2}\sin x$, $\frac{x}{2}$ и $\frac{1}{2}\operatorname{tg} x$, то имеют место неравенства $\sin x < x < \operatorname{tg} x$, $0 < x < \frac{\pi}{2}$. При указанных значениях x $\sin x > 0$. Таким образом, справедливость неравенств $0 < \sin x < x < \operatorname{tg} x$ (при $0 < x < \frac{\pi}{2}$) установлена.

Свойства 1°, 2°, 3° могут быть положены в основу определения функций $\sin x$ и $\cos x$. Можно доказать, что *существует, и притом единственная, пара функций, определенных для всех вещественных значений аргумента, первую из которых мы обозначим через* $\sin x$, *а вторую через* $\cos x$, *удовлетворяющих требованиям* 1°, 2°, 3°.

Доказательство этого утверждения приведено в дополнении к этой главе.

Подчеркнем, что из свойств 1°, 2° и 3° функций $\sin x$ и $\cos x$ можно вывести все известные из элементарного курса свойства тригонометрических функций [1]).

Докажем *непрерывность* тригонометрических функций в каждой точке области их задания. Установим сначала непрерывность функции $y = \sin x$ в точке $x = 0$. Пусть $\{x_n\}$ — произвольная сходящаяся к точке $x = 0$ справа последовательность значений аргумента x. Из неравенств (4.7) имеем $0 < \sin x_n < x_n$. Отсюда, в силу теоремы 3.14, вытекает, что последовательность $\{\sin x_n\}$ имеет предел, равный нулю. Таким образом, $\lim\limits_{x\to 0+0} \sin x = \sin 0 = 0$. Так как при $(-\pi/2) < x < 0$ справедливы неравенства $x < \sin x < 0$ [2]), то рассуждая аналогично, получим $\lim\limits_{x\to 0-0} \sin x = \sin 0$. Мы установили, что в точке $x = 0$ функция $y = \sin x$ непрерывна справа и слева, т. е. является непрерывной в указанной точке. Для доказательства непрерывности функции $y = \sin x$ в любой точке x бесконечной прямой воспользуемся формулой $\sin x'' - \sin x' = 2\cos\dfrac{x''+x'}{2}\sin\dfrac{x''-x'}{2}$, которая может быть получена из формул (4.5). Пусть $\{x_n\}$ — произвольная сходящаяся к x последовательность значений аргумента. Полагая в последней формуле $x'' = x_n$ и $x' = x$, получим

$$\lim_{n\to\infty}(\sin x_n - \sin x) = 2\lim_{n\to\infty}\cos\frac{x_n+x}{2}\sin\frac{x_n-x}{2} = 0.$$

Справедливость этого заключения вытекает из того, что последовательность $\left\{\cos\dfrac{x_n+x}{2}\right\}$ ограниченная [3]), а последовательность $\left\{\sin\dfrac{x_n-x}{2}\right\}$, в силу доказанного выше, бесконечно малая.

Непрерывность функции $y = \cos x$ устанавливается с помощью аналогичных рассуждений из формулы

$$\cos x'' - \cos x' = -2\sin\frac{x''+x'}{2}\sin\frac{x''-x'}{2}.$$

Непрерывность остальных тригонометрических функций ($\operatorname{tg} x$, $\operatorname{ctg} x$, $\sec x$, $\operatorname{cosec} x$) в каждой точке области их задания следует из теоремы 4.2.

---

[1]) Например, равенства $\sin(-x) = -\sin x$, $\cos(-x) = \cos x$.

[2]) Эти неравенства получаются из неравенств (4.7) путем замены x на $-x$ и учета формулы $\sin(-x) = -\sin x$.

[3]) Из третьей формулы (4.5) следует, что $|\cos x| \leqslant 1$ и $|\sin x| \leqslant 1$. Отсюда очевидна ограниченность последовательности $\left\{\cos\dfrac{x_n+x}{2}\right\}$.

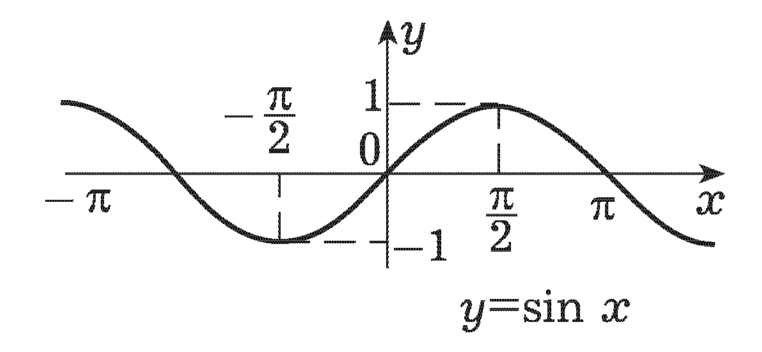


Рис. 4.22

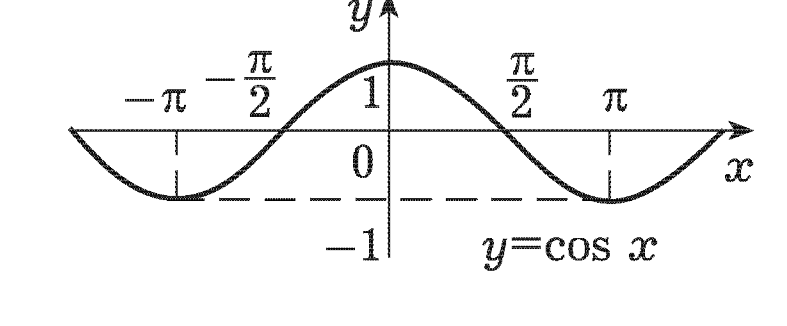


Рис. 4.23

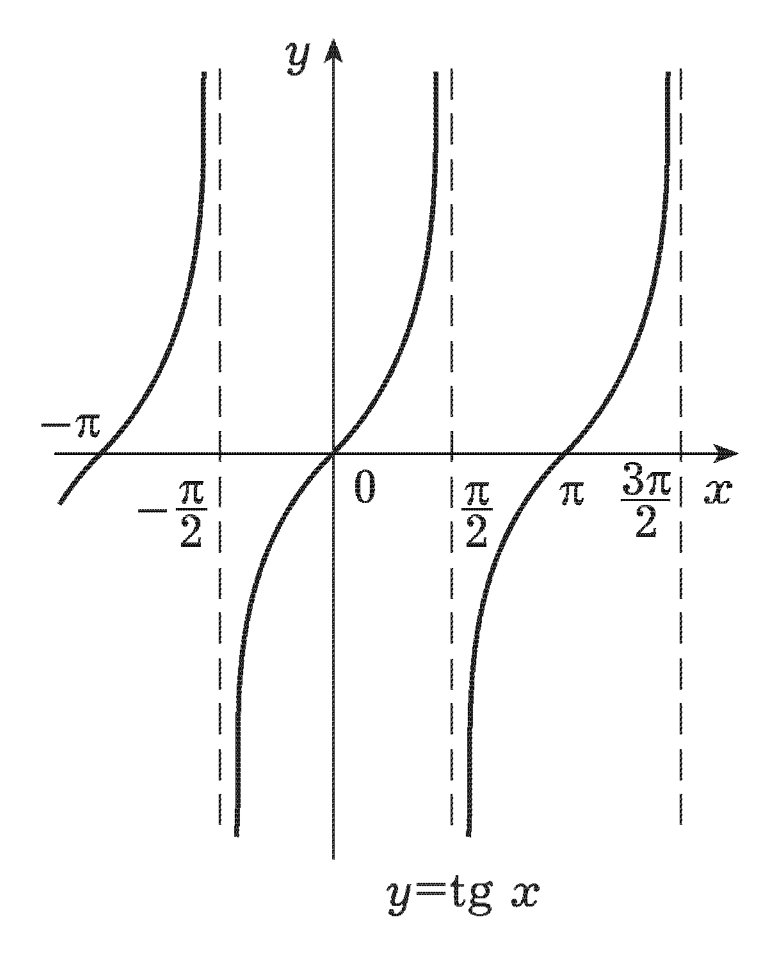


Рис. 4.24

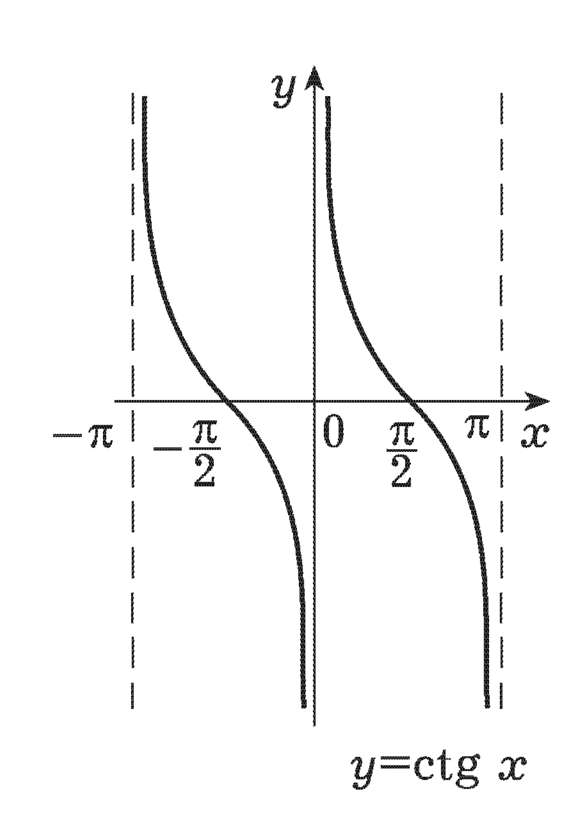


Рис. 4.25

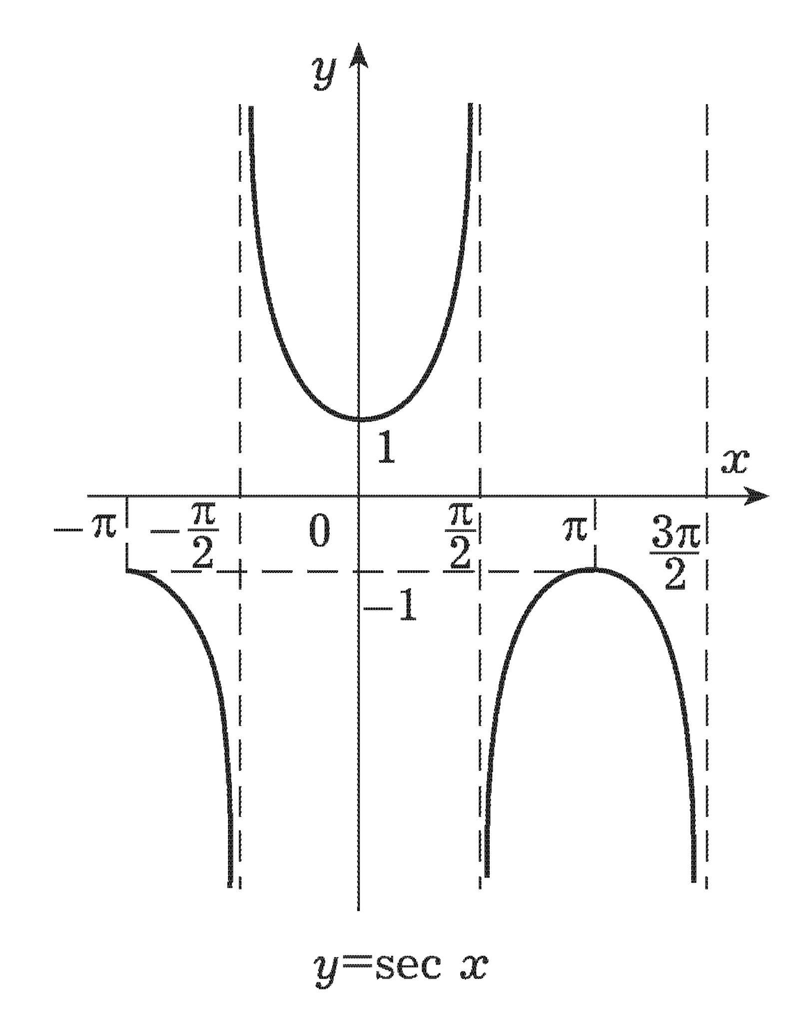


Рис. 4.26

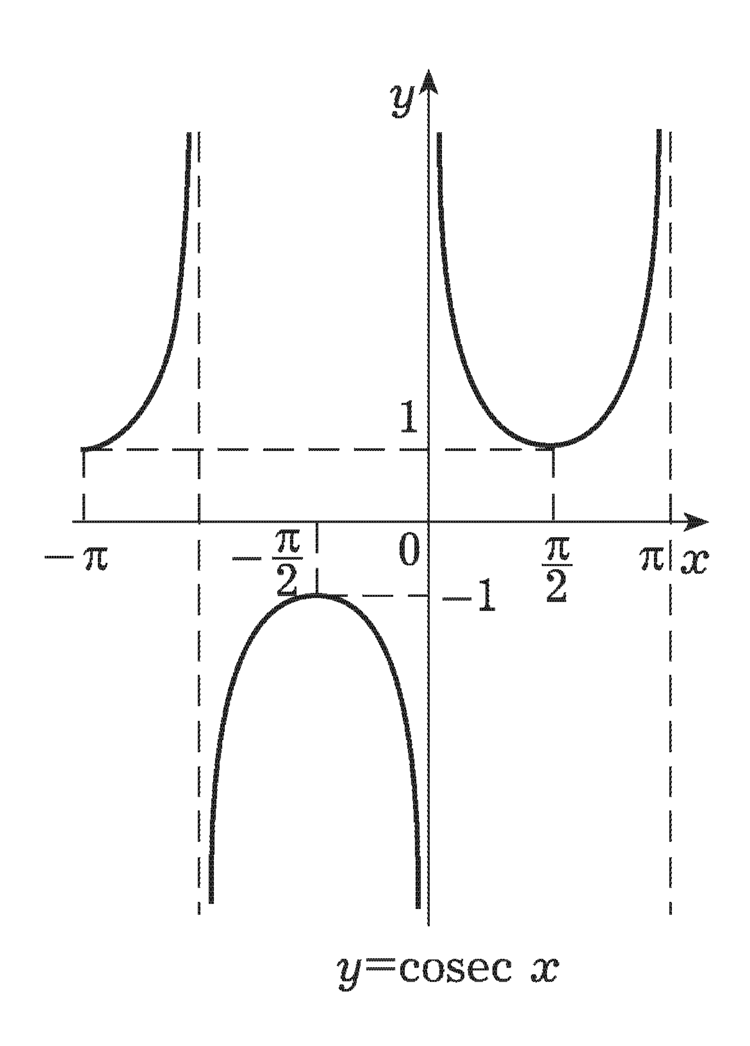


Рис. 4.27

Область задания каждой тригонометрической функции разделяется на участки монотонности этой функции [1]). Функция $y = \sin x$ возрастает на каждом сегменте $\left[2k\pi - \frac{\pi}{2}, 2k\pi + \frac{\pi}{2}\right]$ [2]) и убывает на каждом сегменте $\left[(2k+1)\pi - \frac{\pi}{2}, (2k+1)\pi + \frac{\pi}{2}\right]$. Функция $y = \cos x$ возрастает на каждом сегменте $[(2k-1)\pi, 2k\pi]$ и убывает на каждом сегменте $[2k\pi, (2k+1)\pi]$. Функция $y = \operatorname{tg} x$ возрастает на каждом интервале $\left(k\pi - \frac{\pi}{2}, k\pi + \frac{\pi}{2}\right)$. Функция $y = \operatorname{ctg} x$ убывает на каждом интервале $((k-1)\pi, k\pi)$. Для функций $y = \sec x$ и $y = \operatorname{cosec} x$ читатель без труда установит области возрастания и убывания.

На рисунках 4.22–4.27 изображены графики тригонометрических функций.

7. Обратные тригонометрические функции. Функция $y = \arcsin x$ определяется следующим образом. Рассмотрим на сегменте $[-\pi/2, \pi/2]$ функцию $y = \sin x$. В предыдущем пункте мы отметили, что на этом сегменте функция $y = \sin x$ возрастает, непрерывна и имеет в качестве множества значений сегмент $[-1, 1]$. В силу следствия из леммы 1 для функции $y = \sin x$ на сегменте $[-1, 1]$ существует непрерывная возрастающая обрат-

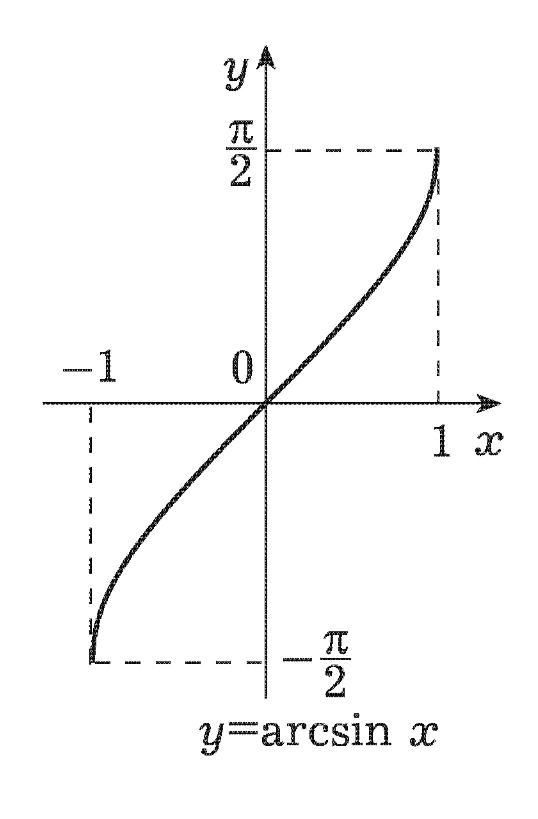


Рис. 4.28

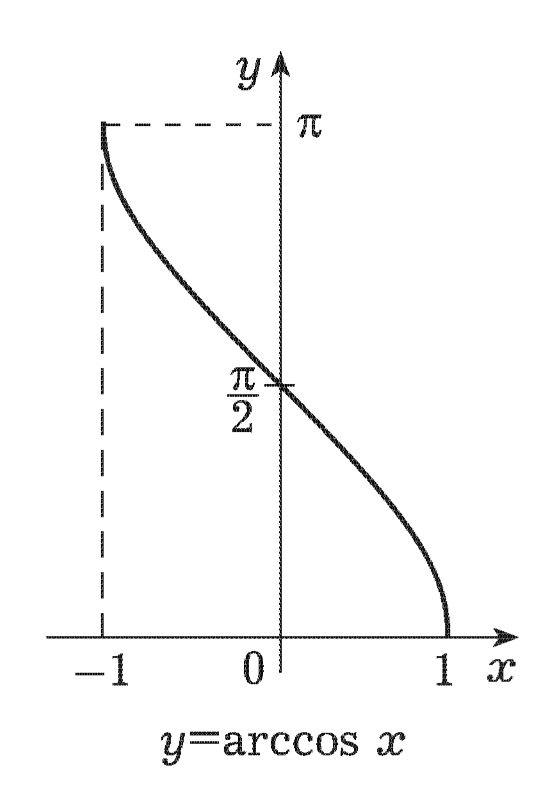


Рис. 4.29

[1]) Монотонность функций $\sin x$ и $\cos x$ на соответствующих сегментах легко установить из формул

$$\sin x'' - \sin x' = 2\cos\frac{x''+x'}{2}\sin\frac{x''-x'}{2},$$

$$\cos x'' - \cos x' = -2\sin\frac{x''+x'}{2}\sin\frac{x''-x'}{2}.$$

[2]) Здесь под k мы понимаем любое целое число.

ная функция. Эту функцию мы будем обозначать $x = \arcsin y$. Меняя для этой функции обозначение аргумента y на x и обозначение x для функции на y, мы получим функцию $y = \arcsin x$. На рис. 4.28 изображен график этой функции.

Совершенно аналогично определяется функция $y = \arccos x$. Областью ее задания служит сегмент $[-1, 1]$, а множеством значений сегмент $[0, \pi]$. Указанная функция убывает и непрерывна на сегменте $[-1, 1]$. На рис. 4.29 изображен график функции $y = \arccos x$.

Функции $y = \operatorname{arctg} x$ и $y = \operatorname{arcctg} x$ определяются как обратные для тангенса и котангенса. Эти функции определены, монотонны и непрерывны на бесконечной прямой. На рис. 4.30 и 4.31 изображены графики этих функций.

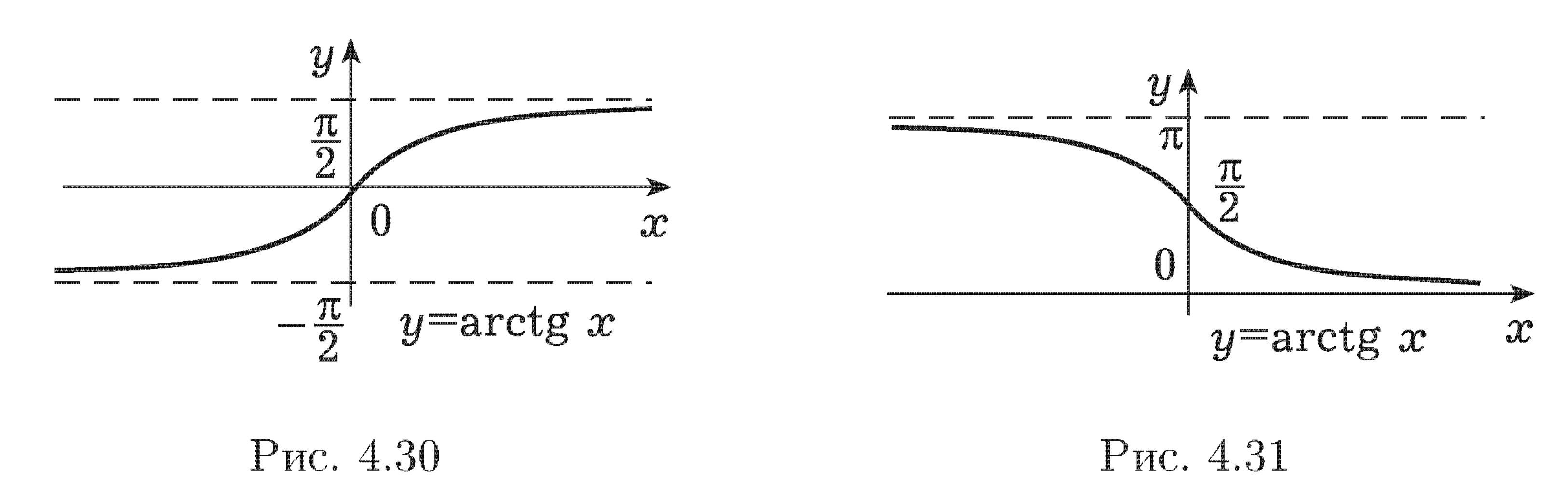


Рис. 4.30 Рис. 4.31

§ 6. Предельные значения некоторых функций

1. Предварительные замечания. В гл. 1 было указано, что для вычисления производных функций $y = \sin x$ и $y = \log_a x$ нужно доказать существование предельных значений (или пределов) функции $\dfrac{\sin(\Delta x/2)}{\Delta x/2}$ при $\Delta x \to 0$ и функции $\left(1 + \dfrac{\Delta x}{x}\right)^{x/\Delta x}$ при $\Delta x \to 0$ и фиксированном $x > 0$. Этому вопросу и посвящен настоящий параграф. Нам понадобится предложение о предельном значении функции, заключенной между двумя функциями, имеющими общее предельное значение в данной точке. Это предложение представляет собой функциональный аналог теоремы 3.14.

Лемма 3. *Пусть в некоторой δ-окрестности точки a (за исключением, быть может, самой точки a) заданы функции $f(x)$, $g(x)$ и $h(x)$, причем функции $f(x)$ и $g(x)$ имеют в точке a одинаковое предельное значение, равное b. Если в указанной окрестности точки a (за исключением, быть может, самой точки a) выполняются неравенства $f(x) \leqslant h(x) \leqslant g(x)$, то предельное значение функции $h(x)$ в точке a существует и равно b.*

Доказательство. Пусть $\{x_n\}$ — произвольная сходящаяся к a последовательность значений аргумента x, элементы x_n которой лежат в указанной δ-окрестности точки a и не

равны a, и $\{f(x_n)\}$, $\{g(x_n)\}$, $\{h(x_n)\}$ — соответствующие последовательности значений функций $f(x)$, $g(x)$ и $h(x)$. По условию

$$\lim_{n\to\infty} f(x_n) = \lim_{n\to\infty} g(x_n) = b \quad \text{и} \quad f(x_n) \leqslant h(x_n) \leqslant g(x_n).$$

Но тогда, в силу теоремы 3.14, $\lim\limits_{n\to\infty} h(x_n) = b$. Поскольку $\{x_n\}$ — произвольная сходящаяся к a последовательность значений аргумента, то последнее равенство означает, что $\lim\limits_{x\to a} h(x) = b$. Лемма доказана.

2. Предельное значение функции $\dfrac{\sin x}{x}$[1]) в точке $x = 0$ (первый замечательный предел). Докажем следующую теорему.

Теорема 4.4. *Предельное значение функции $\dfrac{\sin x}{x}$ в точке $x = 0$ существует и равно единице:*

$$\lim_{x\to 0} \frac{\sin x}{x} = 1. \tag{4.8}$$

Доказательство. Мы уже отмечали, что при $0 < x < \pi/2$ справедливы неравенства $0 < \sin x < x < \operatorname{tg} x$ (см. п. 6 предыдущего параграфа). Деля почленно эти неравенства на $\sin x$, получим

$$1 < \frac{x}{\sin x} < \frac{1}{\cos x} \quad \text{или} \quad \cos x < \frac{\sin x}{x} < 1.$$

Последние неравенства справедливы также и для значений x, удовлетворяющих условиям $-\dfrac{\pi}{2} < x < 0$. Чтобы убедиться в этом, достаточно заметить, что $\cos x = \cos(-x)$ и $\dfrac{\sin x}{x} = \dfrac{\sin(-x)}{-x}$. Так как $\cos x$ — непрерывная функция, то $\lim\limits_{x\to 0} \cos x = 1$. Таким образом, для функций $\cos x$, 1 и $\dfrac{\sin x}{x}$ в некоторой δ-окрестности точки $x = 0$ выполняются все условия леммы 3 (для того чтобы убедиться в этом, обозначим $f(x) = \cos x$, $g(x) = 1$ и $h(x) = \dfrac{\sin x}{x}$ и положим $\delta = \pi/2$). Следовательно, $\lim\limits_{x\to 0} \dfrac{\sin x}{x} = \lim\limits_{x\to 0} \cos x = 1$. Теорема доказана.

---

[1]) Выше мы говорили о функции $\dfrac{\sin(\Delta x/2)}{\Delta x/2}$. Если обозначить $\Delta x/2$ через x, то мы и получим функцию $\dfrac{\sin x}{x}$. Условие $\Delta x \to 0$ при этом обозначении сводится к условию $x \to 0$.

3. Предельное значение функции $\left(1+\frac{1}{x}\right)^x$ при $x \to \infty$ (второй замечательный предел) [1]**.** Докажем следующую теорему.

Теорема 4.5. *Предельное значение функции* $f(x) = \left(1+\frac{1}{x}\right)^x$ *при* $x \to \infty$ *существует и равно* e:

$$\lim_{x\to\infty}\left(1+\frac{1}{x}\right)^x = e. \tag{4.9}$$

Доказательство. Нужно доказать, что, какова бы ни была бесконечно большая последовательность $\{x_k\}$ значений аргумента функции $f(x) = \left(1+\frac{1}{x}\right)^x$, соответствующая последовательность $\{f(x_k)\}$ значений этой функции имеет своим пределом число e. Рассмотрим следующие четыре группы бесконечно больших последовательностей значений аргумента x:

1°. Бесконечно большие последовательности $\{n_k\}$, элементами которых являются целые положительные числа. К указанной группе относится, например, последовательность

$$2, 2, 1, 1, 3, 3, 2, 2, 4, 4, \ldots, n+1, n+1, n, n, \ldots$$

2°. Бесконечно большие последовательности, элементы которых, начиная с некоторого номера, состоят из положительных вещественных чисел.

3°. Бесконечно большие последовательности, элементы которых, начиная с некоторого номера, состоят из отрицательных вещественных чисел.

4°. Бесконечно большие последовательности, содержащие бесконечно много как положительных, так и отрицательных вещественных чисел [2].

Заметим, что совершенно произвольная бесконечно большая последовательность значений аргумента относится к одной из групп 1°, 2°, 3°, 4°. Поэтому теорема будет доказана, если мы проведем доказательство для каждой группы 1°, 2°, 3° и 4°.

---

[1] Упомянутая ранее задача о предельном значении функции $(1+\Delta x/x)^{x/\Delta x}$ при Δx, стремящемся к нулю, и фиксированном $x > 0$ сводится к указанному вопросу. Действительно, если положить $\Delta x/x = 1/u$, то при $\Delta x \to 0$ $u \to \infty$ и $(1+\Delta x/x)^{x/\Delta x} = (1+1/u)^u$, а эта функция отличается от функции $(1+1/x)^x$ только обозначением аргумента.

[2] Так как функция $\left(1+\frac{1}{x}\right)^x$ не определена на сегменте $[-1, 0]$ (поскольку для значений x из этого сегмента выражение $\left(1+\frac{1}{x}\right)$ либо отрицательно, либо не имеет смысла), то естественно считать, что элементы последовательностей 2°, 3° и 4° не принадлежат сегменту $[-1, 0]$.

(При этом последовательности группы 1° имеют вспомогательный характер.) Пусть $\{n_k\}$ — какая-либо последовательность первой группы. Докажем, что $\lim\limits_{n\to\infty}\left(1+\dfrac{1}{n_k}\right)^{n_k} = e$. Пусть ε — любое положительное число. Так как $\lim\limits_{n\to\infty}\left(1+\dfrac{1}{n}\right)^{n} = e$ (см. п. 4 § 3 гл. 3), то можно указать такой номер N^*, что при $n \geqslant N^*$ выполняется неравенство

$$\left|\left(1+\frac{1}{n}\right)^{n} - e\right| < \varepsilon.$$

Поскольку последовательность $\{n_k\}$ бесконечно большая и ее элементы — целые положительные числа, то для положительного числа N^* можно указать такой номер N, что при $k \geqslant N$ выполняется условие $n_k \geqslant N^*$. Но для таких целых n_k, как уже указывалось, выполняется неравенство

$$\left|\left(1+\frac{1}{n_k}\right)^{n_k} - e\right| < \varepsilon.$$

Следовательно,

$$\lim_{k\to\infty}\left(1+\frac{1}{n_k}\right)^{n_k} = e.$$

Перейдем теперь к последовательностям второй группы. Пусть $\{x_k\}$ – любая последовательность второй группы и N — номер, начиная с которого все элементы этой последовательности больше единицы. Считая $k \geqslant N$, обозначим через n_k *целую часть* x_k, $n_k = [x_k]$. Тогда

$$n_k \leqslant x_k < n_k + 1. \tag{4.10}$$

Отметим, что последовательности $\{n_k\}$ и $\{n_k+1\}$ представляют собой последовательности первой группы. Из неравенств (4.10) имеем

$$\frac{1}{n_k+1} < \frac{1}{x_k} \leqslant \frac{1}{n_k}$$

или

$$1+\frac{1}{n_k+1} < 1+\frac{1}{x_k} \leqslant 1+\frac{1}{n_k}.$$

Отсюда, используя еще раз неравенства (4.10), получим

$$\left(1+\frac{1}{n_k+1}\right)^{n_k} < \left(1+\frac{1}{x_k}\right)^{x_k} < \left(1+\frac{1}{n_k}\right)^{n_k+1}. \tag{4.11}$$

Пределы последовательностей $\left\{\left(1+\dfrac{1}{n_k+1}\right)^{n_k}\right\}$ и $\left\{\left(1+\dfrac{1}{n_k}\right)^{n_k+1}\right\}$ равны e. Действительно, первая из этих последовательностей

может быть представлена как произведение последовательностей $\left\{\left(1+\frac{1}{n_k+1}\right)^{n_k+1}\right\}$ и $\left\{\left(1+\frac{1}{n_k+1}\right)^{-1}\right\}$, пределы которых равны соответственно [1] e и 1. Вторая последовательность представляет собой произведение последовательностей $\left\{\left(1+\frac{1}{n_k}\right)^{n_k}\right\}$ и $\left\{\left(1+\frac{1}{n_k}\right)\right\}$, пределы которых также равны соответственно e и 1. В силу неравенств (4.11) по теореме 3.14 имеем

$$\lim_{k\to\infty}\left(1+\frac{1}{x_k}\right)^{x_k} = e.$$

Рассмотрим последовательности третьей группы. Если $\{x_k\}$ — бесконечно большая последовательность, элементы которой, начиная с некоторого номера, отрицательны, то последовательность $\{z_k\}$, где $z_k = -1 - x_k$, бесконечно большая и ее элементы, начиная с некоторого номера, состоят из положительных вещественных чисел. Поэтому $\{z_k\}$ представляет собой последовательность второй группы. Так как

$$\left(1+\frac{1}{x_k}\right)^{x_k} = \left(1+\frac{1}{z_k}\right)^{z_k+1}$$

и

$$\lim_{k\to\infty}\left(1+\frac{1}{z_k}\right)^{z_k+1} = \lim_{k\to\infty}\left(1+\frac{1}{z_k}\right)^{z_k}\left(1+\frac{1}{z_k}\right) = e,$$

то

$$\lim_{k\to\infty}\left(1+\frac{1}{x_k}\right)^{x_k} = e.$$

Для завершения доказательства нам нужно рассмотреть последовательности четвертой группы. Пусть $\{x_k\}$ — такая последовательность. Обозначим через $\{x'_k\}$ подпоследовательность этой последовательности, состоящую из всех неотрицательных элементов [2] последовательности $\{x_k\}$, а через $\{x''_k\}$ — подпоследовательность, состоящую из всех отрицательных элементов последовательности $\{x_k\}$ [3]. Так как по доказанному

$$\lim_{k\to\infty}\left(1+\frac{1}{x'_k}\right)^{x'_k} = e \quad \text{и} \quad \lim_{k\to\infty}\left(1+\frac{1}{x''_k}\right)^{x''_k} = e,$$

---

[1] При этом учитывается, что $\{n_k\}$ принадлежит к первой группе.

[2] Эти элементы, начиная с некоторого номера, строго положительны.

[3] Здесь мы, в отличие от гл. 3, выбранные подпоследовательности отмечаем знаками $'$ и $''$, сохраняя при этом у элемента подпоследовательности тот номер, который он имел в последовательности $\{x_k\}$.

то для любого $\varepsilon > 0$ можно указать номер N такой, что при $k \geqslant N$

$$\left|\left(1+\frac{1}{x'_k}\right)^{x'_k} - e\right| < \varepsilon \quad \text{и} \quad \left|\left(1+\frac{1}{x''_k}\right)^{x''_k} - e\right| < \varepsilon,$$

т. е. при $k \geqslant N$

$$\left|\left(1+\frac{1}{x_k}\right)^{x_k} - e\right| < \varepsilon.$$

Следовательно,

$$\lim_{k\to\infty}\left(1+\frac{1}{x_k}\right)^{x_k} = e.$$

Теорема доказана.

Замечание. Из доказанной теоремы следует, что

$$\lim_{x\to 0}(1+x)^{1/x} = e.$$

В самом деле, пусть $\{x_n\}$ — любая сходящаяся к нулю последовательность значений аргумента функции $(1+x)^{1/x}$, элементы x_n которой отличны от нуля. Тогда последовательность $\{z_n\}$, где $z_n = 1/x_n$, бесконечно большая (см. теорему 3.6). Так как

$$(1+x_n)^{1/x_n} = \left(1+\frac{1}{z_n}\right)^{z_n} \text{ и } \lim_{n\to\infty}\left(1+\frac{1}{z_n}\right)^{z_n} = e,$$

то

$$\lim_{n\to\infty}(1+x_n)^{1/x_n} = e,$$

и поэтому

$$\lim_{x\to 0}(1+x)^{1/x} = e.$$

§ 7. Непрерывность и предельные значения некоторых сложных функций

1. Непрерывность и предельные значения некоторых сложных функций. Докажем непрерывность некоторых сложных функций.

1°. Пусть $x = \varphi(t)$ и $y = f(x)$ — простейшие элементарные функции (см. § 5), причем множество значений $\{x\}$ функции $x = \varphi(t)$ является областью задания функции $y = f(x)$. Из результатов § 5 следует, что простейшие элементарные функции непрерывны в каждой точке области задания. Поэтому, в силу теоремы 4.3, сложная функция $y = f[\varphi(t)]$, т. е. суперпозиция двух элементарных функций, непрерывна. Например, функция $y = \sin\dfrac{1}{x}$ непрерывна в любой точке $x \neq 0$. Чтобы убедиться в этом, достаточно рассмотреть функции $x = t^{-1}$ и $y = \sin x$. Сложная функция $y = \sin t^{-1}$ только обозначением аргумента

отличается от функции $y = \sin\frac{1}{x}$ и, в силу сказанного выше, непрерывна в любой точке $t \neq 0$. Рассуждая аналогично, легко убедиться, что функция $y = \ln\sin x$ непрерывна в любой точке каждого интервала $(2k\pi, (2k+1)\pi)$ [1]).

2°. Степенно-показательные выражения $u(x)^{v(x)}$.

Очевидно, имеет смысл лишь случай, когда $u(x) > 0$. Легко убедиться, что если $u(x)$ и $v(x)$ непрерывны в точке a и $u(x) > 0$ в окрестности точки a, то функция $u(x)^{v(x)}$ также непрерывна в точке a.

В самом деле, $u(x)^{v(x)} = e^{v(x)\ln u(x)}$. Поскольку $\ln u(x)$ представляет собой непрерывную в точке a функцию, то и функция $v(x)\ln u(x)$ также непрерывна в точке a. Но тогда функция $e^{v(x)\ln u(x)}$ непрерывна в точке a. Отметим, что установленное свойство непрерывности позволяет утверждать, что при сделанных предположениях $\lim\limits_{x\to a} u(x)^{v(x)} = u(a)^{v(a)}$.

3°. Предельные значения степенно-показательных выражений.

Выясним вопрос о предельных значениях степенно-показательных выражений $u(x)^{v(x)}$ при $x \to a$. При этом мы будем предполагать, что $u(x) > 0$ в некоторой окрестности точки a.

Из соотношения $u(x)^{v(x)} = e^{v(x)\ln u(x)}$ видно, что предельное значение выражения $u(x)^{v(x)}$ при $x \to a$ зависит от предельного значения выражения $v(x)\ln u(x)$.

I. Пусть $\lim\limits_{x\to a} v(x)\ln u(x) = b$.

Убедимся, что в этом случае $\lim\limits_{x\to a} u(x)^{v(x)} = e^b$.

В самом деле, функция

$$w(x) = \begin{cases} v(x)\ln u(x) & \text{при} \quad x \neq a, \\ b & \text{при} \quad x = a \end{cases}$$

непрерывна в точке $x = a$. Поэтому и сложная функция $e^{w(x)}$ непрерывна в этой точке. Следовательно, $\lim\limits_{x\to a} e^{w(x)} = e^{w(a)} = e^b$. Так как $\lim\limits_{x\to a} e^{w(x)} = \lim\limits_{x\to a} e^{v(x)\ln u(x)}$, то $\lim\limits_{x\to a} u(x)^{v(x)}$ существует и равен e^b.

Используя полученные в этой главе сведения о предельных значениях e^w при $w \to -\infty$ и $w \to +\infty$, легко убедиться в следующем.

II. Если $\lim\limits_{x\to a} v(x)\ln u(x) = -\infty$, то $\lim\limits_{x\to a} u(x)^{v(x)} = 0$.

III. Если $\lim\limits_{x\to a} v(x)\ln u(x) = +\infty$, то $\lim\limits_{x\to a} u(x)^{v(x)} = +\infty$.

Установленная связь между предельными значениями выражений $u(x)^{v(x)}$ и $v(x)\ln u(x)$ позволяет в ряде случаев легко найти предельное зна-

[1]) Там, где $\sin x > 0$.

чение функции $u(x)^{v(x)}$, если известны предельные значения функций $u(x)$ и $v(x)$. Рассмотрим для примера следующие случаи:

1) существует $\lim\limits_{x\to a} u(x) > 0$ и $\lim\limits_{x\to a} v(x)$;

2) $\lim\limits_{x\to a} u(x) = b$, $b > 1$, $\lim\limits_{x\to a} v(x) = +\infty$;

3) $\lim\limits_{x\to a} u(x) = b$, $b > 1$, $\lim v(x) = -\infty$.

Убедимся, что в случае 1) $\lim\limits_{x\to a} u(x)^{v(x)} = \left[\lim\limits_{x\to a} u(x)\right]^{\lim\limits_{x\to a} v(x)}$. Действительно, так как $\lim\limits_{x\to a} u(x) > 0$, то, в силу непрерывности логарифмической функции, $\lim\limits_{x\to a} \ln u(x)$ существует и равен $\ln\left[\lim\limits_{x\to a} u(x)\right]$. Поэтому существует $\lim\limits_{x\to a} v(x)\ln u(x) = \lim\limits_{x\to a} v(x)\ln\left[\lim\limits_{x\to a} u(x)\right]$.

Согласно I отсюда вытекает, что

$$\lim_{x\to a} u(x)^{v(x)} = e^{\lim\limits_{x\to a} v(x)\ln u(x)} = e^{\lim\limits_{x\to a} v(x)\ln[\lim\limits_{x\to a} u(x)]} = \left[\lim_{x\to a} u(x)\right]^{\lim\limits_{x\to a} v(x)}.$$

В случае 2) $\lim\limits_{x\to a} v(x)\ln u(x) = +\infty$, и поэтому, согласно III, $\lim\limits_{x\to a} u(x)^{v(x)} = +\infty$.

В случае 3) $\lim\limits_{x\to a} v(x)\ln u(x) = -\infty$, и поэтому, согласно II, $\lim\limits_{x\to a} u(x)^{v(x)} = 0$.

В заключение укажем три случая, для которых нахождение предельного значения $u(x)^{v(x)}$ требует дополнительных исследований.

1. *Неопределенность типа* 1^∞:

$$\lim_{x\to a} u(x) = 1, \qquad \lim_{x\to a} v(x) = \infty.$$

2. *Неопределенность типа* 0^0:

$$\lim_{x\to a} u(x) = 0, \qquad \lim_{x\to a} v(x) = 0.$$

3. *Неопределенность типа* ∞^0:

$$\lim_{x\to a} u(x) = +\infty, \qquad \lim_{x\to a} v(x) = 0.$$

Для первого из этих случаев мы приведем формулу, удобную для практических приложений.

Преобразуем выражение $u(x)^{v(x)}$ следующим образом:

$$u(x)^{v(x)} = \left\{[1 + (u(x) - 1)]^{\frac{1}{u(x)-1}}\right\}^{[u(x)-1]v(x)}.$$

Положим, далее,

$$U(x) = [1 + (u(x) - 1)]^{\frac{1}{u(x)-1}} \quad \text{и} \quad V(x) = [u(x) - 1]v(x),$$

так что

$$u(x)^{v(x)} = U(x)^{V(x)}.$$

Поскольку $\lim\limits_{x\to a} U(x) = e$ (см. замечание к теореме 4.5) и $e > 1$, то значение $\lim\limits_{x\to a} u(x)^{v(x)} = \lim\limits_{x\to a} U(x)^{V(x)}$ *зависит* от предельного значения функции $V(x)$ в точке a, т. е. от $\lim\limits_{x\to a}[u(x) - 1]v(x)$. Именно: если $\lim\limits_{x\to a}[u(x) - 1]v(x) = \lim\limits_{x\to a} V(x) = c$, то $\lim\limits_{x\to a} u(x)^{v(x)} = \lim\limits_{x\to a} U(x)^{V(x)} = e^c$ (см. случай 1)); если $\lim\limits_{x\to a}[u(x) - 1]v(x) = +\infty$, то $\lim\limits_{x\to a} u(x)^{v(x)} = +\infty$ (см. случай 2)); если

$\lim\limits_{x\to a}[u(x)-1]v(x) = -\infty$, то $\lim\limits_{x\to a} u(x)^{v(x)} = 0$ (см. случай 3)). Таким образом, мы получаем следующую формулу:

$$\lim_{x\to a} u(x)^{v(x)} = e^{\lim\limits_{x\to a}[u(x)-1]v(x)}.$$

Неопределенности типа 2 и 3 приводятся к неопределенности типа 1 следующим образом.

Положим

$$U(x) = e^{v(x)}, \qquad V(x) = \ln u(x).$$

Очевидно, $\lim\limits_{x\to a} U(x) = 1$ и $\lim\limits_{x\to a} V(x) = \pm\infty$. Кроме того,

$$u(x)^{v(x)} = \left[e^{V(x)}\right]^{\ln U(x)} = e^{\ln U(x)^{V(x)}} = U(x)^{V(x)}.$$

П р и м е р. Найти $\lim\limits_{x\to 0}[\cos x]^{\frac{1}{\sin^2 x}}$. Так как $\lim\limits_{x\to 0}\cos x = 1$, а $\lim\limits_{x\to 0}\dfrac{1}{\sin^2 x} = \infty$, то налицо неопределенность типа 1^∞.

Используем формулу $\lim\limits_{x\to 0} u(x)^{v(x)} = e^{\lim\limits_{x\to 0}[u(x)-1]v(x)}$, полученную нами выше. Имеем

$$\lim_{x\to 0}[u(x)-1]v(x) = \lim_{x\to 0}[\cos x - 1]\frac{1}{\sin^2 x} =$$
$$= \lim_{x\to 0}\left[-2\sin^2\frac{x}{2}\right]\frac{1}{4\sin^2\dfrac{x}{2}\cos^2\dfrac{x}{2}} = -\frac{1}{2}\lim_{x\to 0}\frac{1}{\cos^2\dfrac{x}{2}} = -\frac{1}{2}.$$

Поэтому

$$\lim_{x\to 0}[\cos x]^{\frac{1}{\sin^2 x}} = e^{-\frac{1}{2}} = \frac{1}{\sqrt{e}}.$$

4°. П р е д е л ь н ы е з н а ч е н и я н е к о т о р ы х с л о ж н ы х ф у н к ц и й. Докажем справедливость следующих равенств:

$$\lim_{x\to 0}\frac{\sqrt[n]{1+x}-1}{x} = \frac{1}{n}, \quad \lim_{x\to 0}\frac{\ln(1+x)}{x} = 1,$$
$$\lim_{x\to 0}\frac{e^x-1}{x} = 1, \quad \lim_{x\to 0}\frac{1-\cos x}{x^2} = \frac{1}{2}. \tag{4.12}$$

1) Рассмотрим первый из этих пределов. Имеем

$$\frac{\sqrt[n]{1+x}-1}{x} = \frac{(1+x)^{\frac{1}{n}}-1}{x} =$$
$$= \frac{\left[(1+x)^{\frac{1}{n}}-1\right]\left[(1+x)^{\frac{n-1}{n}}+(1+x)^{\frac{n-2}{n}}+\ldots+(1+x)^{\frac{1}{n}}+1\right]}{x\left[(1+x)^{\frac{n-1}{n}}+(1+x)^{\frac{n-2}{n}}+\ldots+(1+x)^{\frac{1}{n}}+1\right]} =$$
$$= \frac{\left[(1+x)^{\frac{1}{n}}\right]^n-1}{x\left[(1+x)^{\frac{n-1}{n}}+(1+x)^{\frac{n-2}{n}}+\ldots+(1+x)^{\frac{1}{n}}+1\right]} =$$
$$= \frac{1}{(1+x)^{\frac{n-1}{n}}+(1+x)^{\frac{n-2}{n}}+\ldots+(1+x)^{\frac{1}{n}}+1}.$$

Так как знаменатель последнего выражения при $x \to 0$ имеет предел, равный n (функция $(1+x)^{k/n}$ непрерывна в точке $x=0$ и поэтому $\lim\limits_{x\to 0}(1+x)^{k/n}=1$), то $\lim\limits_{x\to 0}\dfrac{\sqrt[n]{1+x}-1}{x}=\dfrac{1}{n}$.

2) Перейдем к доказательству второго равенства (4.12). Имеем $\dfrac{\ln(1+x)}{x}=\ln(1+x)^{1/x}$. Доопределим функцию $f(x)=(1+x)^{1/x}$, полагая $f(0)=\lim\limits_{x\to 0}f(x)=\lim\limits_{x\to 0}(1+x)^{1/x}=e$. В результате мы получим непрерывную в точке $x=0$ функцию $f(x)$. Тогда и функция $\ln f(x)$ также будет непрерывна в нулевой точке, и поэтому $\lim\limits_{x\to 0}\ln(1+x)^{1/x}=\ln f(0)=\ln e=1$. Итак, $\lim\limits_{x\to 0}\dfrac{\ln(1+x)}{x}=1$.

3) Докажем справедливость третьего равенства (4.12). Положим $x=\ln(1+u)$ и заметим, что при $x\to 0$ переменная u стремится к нулю. Имеем $\dfrac{e^x-1}{x}=\dfrac{u}{\ln(1+u)}$. Отсюда следует, что

$$\lim_{x\to 0}\frac{e^x-1}{x}=\lim_{u\to 0}\frac{u}{\ln(1+u)}=1.$$

4) Докажем справедливость последнего равенства (4.12). Имеем $\dfrac{1-\cos x}{x^2}=\dfrac{2\sin^2(x/2)}{x^2}=\dfrac{1}{2}\dfrac{\sin^2(x/2)}{(x/2)^2}$. Так как $\lim\limits_{x\to 0}\dfrac{\sin^2(x/2)}{(x/2)^2}=$ $=1$ (см. (4.8)), то $\lim\limits_{x\to 0}\dfrac{1-\cos x}{x^2}=\dfrac{1}{2}$.

Используя соотношения (4.8), (4.12), равенство (4.1) и символ $o(x)$ (см. п. 3 § 2), легко убедиться в справедливости следующих формул:

$$\begin{aligned}
\sin x &= x+o(x),\\
\sqrt[n]{1+x} &= 1+\frac{x}{n}+o(x),\\
\ln(1+x) &= x+o(x),\\
e^x &= 1+x+o(x),\\
\cos x &= 1-\frac{x^2}{2}+o(x^2).
\end{aligned}\tag{4.13}$$

Докажем, например, справедливость первой формулы. Так как $\lim\limits_{x\to 0}\dfrac{\sin x}{x}=1$, то в силу (4.1) $\dfrac{\sin x}{x}=1+\alpha(x)$, где $\alpha(x)$ — бесконечно малая в точке $x=0$ функция. Из последней формулы вытекает, что $\sin x=x+x\alpha(x)$. Поскольку $x\alpha(x)=o(x)$, то $\sin x=x+o(x)$.

2. Понятие элементарной функции. Класс элементарных функций. В приложениях важную роль играет класс функций, получаемых посредством конечного числа арифметических операций над простейшими элементарными функциями,

а также получаемых путем суперпозиции этих функций. Например, функции $x^3 + 3\cos 2x$, $\ln|\sin 3x| - e^{\operatorname{arctg}\sqrt{x}}$ принадлежат этому классу. Мы будем называть этот класс функций *классом элементарных функций*, а каждую функцию этого класса — *элементарной*.

Отметим следующее свойство элементарных функций — *они непрерывны в каждой точке области задания*[1]).

Это свойство непосредственно вытекает из теорем 4.2 и 4.3 и непрерывности простейших элементарных функций в каждой точке области задания.

§ 8. Классификация точек разрыва функции

1. Точки разрыва функции и их классификация. В п. 1 § 3 мы определили точки разрыва функции как точки, в которых функция не обладает свойством непрерывности. Мы будем называть также точками разрыва функции точки, в которых функция не определена, но в любой ε-окрестности которых имеются точки области задания функции.

Рассмотрим возможные типы точек разрыва функции.

1°. Устранимый разрыв. *Точка a называется точкой устранимого разрыва функции $y = f(x)$, если предельное значение функции в этой точке существует, но в точке a функция $f(x)$ или не определена, или ее частное значение $f(a)$ в точке a не равно предельному значению.*

Например, функция

$$f(x) = \begin{cases} \dfrac{\sin x}{x} & \text{при} \quad x \neq 0, \\ 2 & \text{при} \quad x = 0 \end{cases}$$

имеет в нулевой точке устранимый разрыв, поскольку предельное значение этой функции в точке $x = 0$ равно 1, а частное равно 2. Если функция $f(x)$ имеет в точке a разрыв указанного типа, то этот разрыв *можно устранить*, не изменяя при этом значений функции в точках, отличных от a. Для этого достаточно определить значение функции в точке a равным ее предельному значению в этой точке. Так, если в рассмотренном примере положить $f(0) = 1$, то $\lim\limits_{x\to 0} f(x) = f(0)$ и функция будет непрерывной в точке $x = 0$.

Замечание. На практике точки устранимого разрыва встречаются при сосредоточенных распределениях физических величин.

---

[1]) Если при этом область задания функции окажется состоящей из отдельных изолированных точек, то естественно считать, что функция по определению непрерывна в каждой из этих точек.

2°. *Разрыв 1-го рода.* *Точка a называется точкой разрыва 1-го рода, если в этой точке функция $f(x)$ имеет конечные, но не равные друг другу правое и левое предельные значения:*

$$\lim_{x\to a+0} f(x) \neq \lim_{x\to a-0} f(x)$$
$$(\text{или } f(a+0) \neq f(a-0)).$$

1. Для функции $f(x) = \operatorname{sgn} x$ точка $x = 0$ является точкой разрыва 1-го рода (см. рис. 4.4). Действительно, так как

$$\operatorname{sgn} x = \begin{cases} 1 & \text{при} \quad x > 0, \\ 0 & \text{при} \quad x = 0, \\ -1 & \text{при} \quad x < 0, \end{cases}$$

то

$$\lim_{x\to 0+0} \operatorname{sgn} x = 1, \qquad \lim_{x\to 0-0} \operatorname{sgn} x = -1.$$

2. Функция $f(x) = \dfrac{1}{1+2^{1/x}}$, определенная всюду, кроме точки $x = 0$, имеет в точке $x = 0$ разрыв 1-го рода (рис. 4.32). В самом деле, если $\{x_n\}$ — сходящаяся к нулю последовательность, элементы которой положительны, то $\left\{\dfrac{1}{x_n}\right\}$ — бесконечно большая последовательность с положительными членами, и поэтому $\left\{1 + 2^{1/x_n}\right\}$ — также бесконечно большая последовательность. Но тогда последовательность $\left\{\dfrac{1}{1+2^{1/x_n}}\right\}$ бесконечно малая, и поэтому $\lim\limits_{x\to 0+0} f(x)=0$. Если же $\{x_n\}$ — сходящаяся к нулю последовательность, элементы которой отрицательны, то $\left\{\dfrac{1}{x_n}\right\}$ — бесконечно большая последовательность с отрицательными членами, и поэтому $\lim\limits_{n\to\infty} 2^{1/x_n} = 0$. Следовательно, $\lim\limits_{x\to 0-0} f(x) = 1$.

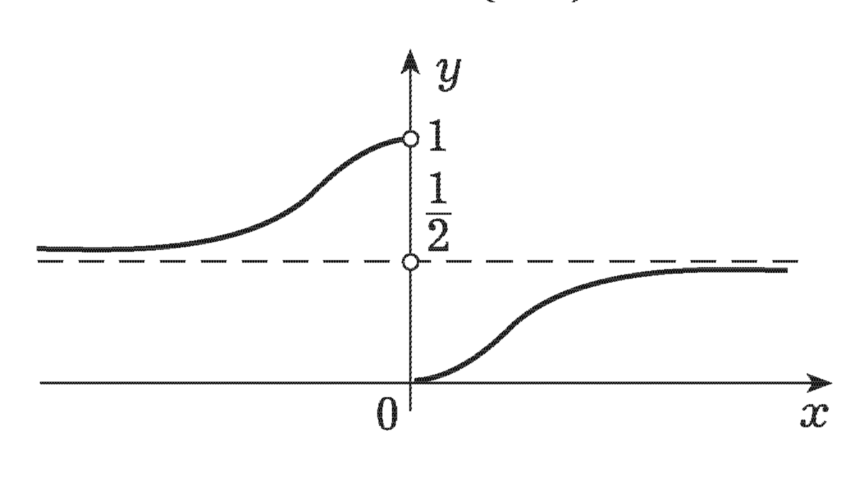


Рис. 4.32

3°. *Разрыв 2-го рода.* *Точка a называется точкой разрыва 2-го рода, если в этой точке функция $f(x)$ не имеет по крайней мере одного из односторонних предельных значений или если хотя бы одно из односторонних предельных значений бесконечно.*

Рассмотрим, например, функцию $f(x) = \sin\frac{1}{x}$ (рис. 4.33) [1]. Эта функция в точке $x = 0$ не имеет ни правого, ни левого предельного значения. Действительно, рассмотрим следующие сходящиеся к нулю справа последовательности значений аргумента:

$$\frac{2}{\pi}, \frac{2}{5\pi}, \frac{2}{9\pi}, \ldots, \frac{2}{(4n-3)\pi}, \ldots$$

и

$$\frac{1}{\pi}, \frac{1}{2\pi}, \frac{1}{3\pi}, \ldots, \frac{1}{n\pi}, \ldots$$

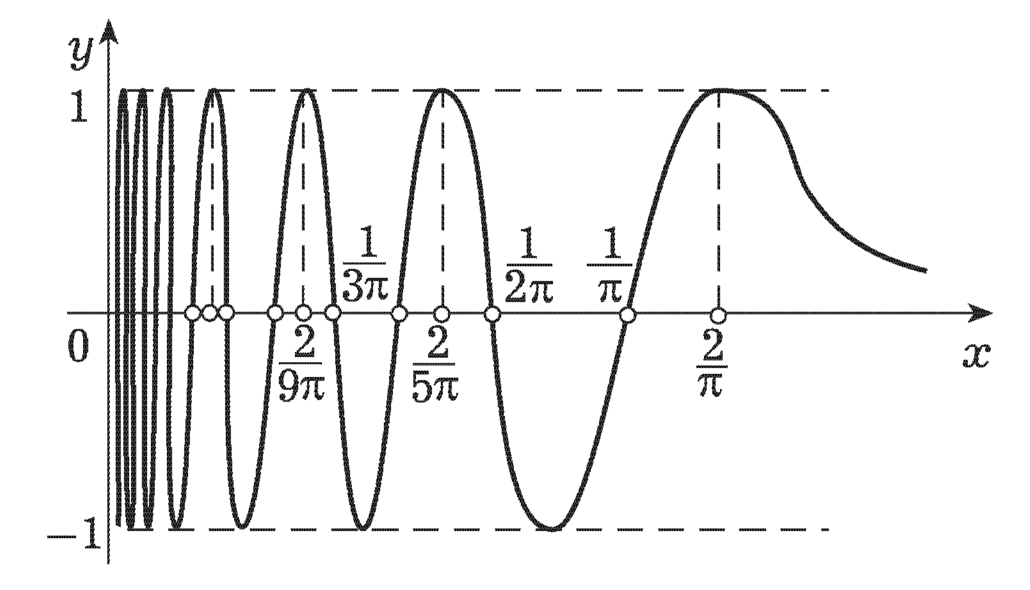


Рис. 4.33

Соответствующие последовательности значений функции $y = \sin\frac{1}{x}$ имеют следующий вид:

$$1,\ 1,\ 1,\ \ldots,\ 1,\ \ldots$$

и

$$0,\ 0,\ 0,\ \ldots,\ 0,\ \ldots$$

Первая из этих последовательностей имеет предел, равный единице, а вторая имеет предел, равный нулю. Следовательно, функция $f(x) = \sin\frac{1}{x}$ в точке $x = 0$ не имеет правого предельного значения. Так как $\sin\frac{1}{-x} = -\sin\frac{1}{x}$, то эта функция не имеет и левого предельного значения в этой точке.

Другим примером функции, имеющей точки разрыва 2-го рода, может служить функция $y = \operatorname{ctg} x$ (см. рис. 4.25). Эта функция имеет разрыв 2-го рода в каждой из точек πn, $n = 0, \pm 1, \pm \pm 2, \ldots$

2. Кусочно непрерывные функции. Функция $y = f(x)$ называется *кусочно непрерывной* на сегменте $[a, b]$, если она непрерывна во всех внутренних точках $[a, b]$, за исключением, быть может, конечного числа точек, в которых имеет разрыв 1-го рода и, кроме того, имеет односторонние предельные значения в точках a и b. Функция называется кусочно непрерывной на интервале или бесконечной прямой, если она кусочно непрерывна на любом принадлежащем им сегменте. Например, функция $f(x) = [x]$ [2] кусочно непрерывна как на любом сегменте, так и на бесконечной прямой.

---

[1] Рисунок 4.33 носит чисто иллюстративный характер.

[2] Напомним, что символ $[x]$ обозначает целую часть числа x.

ДОПОЛНЕНИЕ

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО УТВЕРЖДЕНИЯ ИЗ П. 6 § 5

В настоящем дополнении дается доказательство утверждения из п. 6 § 5. Для удобства сформулируем здесь это утверждение в следующей форме.

Существует, и притом единственная, пара функций $S(x)$ *и* $C(x)$, *определенных на всей бесконечной прямой и удовлетворяющих следующим трем требованиям:*

1°. *Для любых вещественных чисел* x', x'' *и* x *выполняются соотношения*

$$S(x' + x'') = S(x')C(x'') + C(x')S(x''),$$
$$C(x' + x'') = C(x')C(x'') - S(x')S(x''),$$
$$S^2(x) + C^2(x) = 1. \qquad (4.5')$$ [1]

2°.

$$S(0) = 0, \qquad C(0) = 1,$$
$$S\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1, \quad C\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0. \qquad (4.6')$$

3°. *При* $0 < x < \frac{\pi}{2}$ *справедливы неравенства*

$$0 < S(x) < x. \qquad (4.7')$$

Доказательство этого утверждения мы разделим на две части. Именно: сначала мы докажем *единственность*, а затем *существование* функций $S(x)$ и $C(x)$, удовлетворяющих требованиям 1°, 2° и 3°.

1. Доказательство единственности. Для доказательства единственности достаточно убедиться в справедливости следующих двух утверждений:

1) *Функции* $S(x)$ *и* $C(x)$, *обладающие перечисленными свойствами, непрерывны на всей числовой прямой.*

2) *Значения функций* $S(x)$ *и* $C(x)$ *определяются единственным образом на некотором всюду плотном множестве точек бесконечной прямой* [2].

Действительно, в силу непрерывности функций $S(x)$ и $C(x)$ их частные значения в каждой точке x бесконечной прямой равны их предельным значениям в этой точке. Если теперь мы рассмотрим сходящуюся к x последовательность значений аргумента, элементы которой принадлежат указанному выше всюду плотному множеству точек, то соответствующие последовательности значений функций $S(x)$ и $C(x)$, в силу сформулированного выше утверждения 2), определяются единственным образом, а поэтому и пределы этих последовательностей определяются также единственным образом. Но эти пределы как раз и являются частными значениями функций $S(x)$ и $C(x)$ в точке x. Следовательно, функции $S(x)$ и $C(x)$ определяются единственным образом на всей бесконечной прямой.

---

[1] Формулы (4.5′)–(4.7′) получены из формул (4.5)–(4.7) п. 6 § 5 путем замены обозначений функций $\sin x$ и $\cos x$ на $S(x)$ и $C(x)$ соответственно.

[2] Множество $\{x\}$ точек бесконечной прямой называется *всюду плотным* на бесконечной прямой, если в любой ε-окрестности каждой точки этой прямой имеется бесконечно много точек множества $\{x\}$.

1) Прежде чем перейти к доказательству непрерывности функций $S(x)$ и $C(x)$, установим некоторые формулы.

Полагая в первых двух из соотношений (4.5′) $x' = x$, $x'' = -x$ и учитывая, что $S(0) = 0$, $C(0) = 1$, получим

$$\begin{aligned} 0 &= S(x)\cdot C(-x) + C(x)\cdot S(-x),\\ 1 &= C(x)\cdot C(-x) - S(x)\cdot S(-x). \end{aligned} \tag{4.14}$$

Умножим соотношения (4.14) соответственно на $S(x)$ и $C(x)$ и сложим полученные при этом соотношения. Учитывая, что $S^2(x)+C^2(x) = 1$, получим $C(-x) = C(x)$.

Совершенно аналогично, умножая соотношения (4.14) соответственно на $C(x)$ и $-S(x)$ и складывая их, получим $S(-x) = -S(x)$. Таким образом, $C(x)$ — *четная* функция, а $S(x)$ — *нечетная* функция [1]).

Но тогда, используя первую из формул (4.5′), получим

$$S(x'') = S\left(\frac{x'+x''}{2} + \frac{x''-x'}{2}\right) = \\ = S\left(\frac{x'+x''}{2}\right)C\left(\frac{x''-x'}{2}\right) + C\left(\frac{x'+x''}{2}\right)S\left(\frac{x''-x'}{2}\right)$$

и аналогично

$$S(x') = S\left(\frac{x'+x''}{2} + \frac{x'-x''}{2}\right) = S\left(\frac{x'+x''}{2}\right)C\left(-\frac{x''-x'}{2}\right) + \\ + C\left(\frac{x'+x''}{2}\right)S\left(-\frac{x''-x'}{2}\right) = S\left(\frac{x'+x''}{2}\right)C\left(\frac{x''-x'}{2}\right) - \\ - C\left(\frac{x'+x''}{2}\right)S\left(\frac{x''-x'}{2}\right).$$

Вычитая почленно последние две формулы, получим

$$S(x'') - S(x') = 2C\left(\frac{x'+x''}{2}\right)S\left(\frac{x''-x'}{2}\right). \tag{4.15}$$

Докажем теперь непрерывность функций $C(x)$ и $S(x)$ в любой точке x бесконечной прямой. Заметим, что непрерывность функции $S(x)$ *в точке* $x = 0$ *справа* непосредственно вытекает из соотношения (4.7′) и из равенства $S(0) = 0$. В самом деле, если $\{x_n\}$ — произвольная последовательность значений аргумента, сходящаяся к нулю справа, то из соотношения $0 < S(x_n) < x_n$ следует, что и соответствующая последовательность значений функции $\{S(x_n)\}$ сходится к нулю, т. е. к частному значению $S(0)$.

Из *нечетности* функции $S(x)$ вытекает непрерывность этой функции *в точке* $x = 0$ *слева*. Таким образом, функция $S(x)$ *непрерывна в точке* $x = 0$.

Непрерывность $S(x)$ *в любой точке* x вытекает из соотношения (4.15). В самом деле, пусть x — *любая точка бесконечной прямой*, $\{x_n\}$ — *произвольная сходящаяся к* x *последовательность значений аргумента*. Положив в (4.15) $x' = x$, $x'' = x_n$, будем иметь

$$S(x_n) - S(x) = 2C\left(\frac{x+x_n}{2}\right)S\left(\frac{x_n-x}{2}\right). \tag{4.16}$$

---

[1]) Функция $f(x)$, определенная на бесконечной прямой, называется *нечетной*, если $f(-x) = -f(x)$, и *четной*, если $f(-x) = f(x)$.

В силу того, что $S(x)$ непрерывна в нуле и $S(0) = 0$, получим, что $\lim\limits_{n\to\infty} S\left(\frac{x_n - x}{2}\right) = 0$. Поскольку последовательность $\left\{C\left(\frac{x + x_n}{2}\right)\right\}$ *ограниченная* [1]), правая (а стало быть, и левая) часть (4.16) имеет своим пределом нуль. Но это означает, что $\lim\limits_{n\to\infty} S(x_n) = S(x)$, т. е. функция $S(x)$ непрерывна в точке x.

Аналогично доказывается непрерывность функции $C(x)$. Для этого вместо (4.15) нужно получить формулу

$$C(x'') - C(x') = -2S\left(\frac{x'' + x'}{2}\right) S\left(\frac{x'' - x'}{2}\right).$$

2) Докажем, что значения функций $S(x)$ в $C(x)$ определяются единственным образом в точках $\frac{p\pi}{2^n}$, где p — целое положительное или отрицательное число, а n — целое положительное число. Отметим, что такие точки образуют всюду плотное множество точек числовой прямой. Предварительно установим некоторые свойства функций $S(x)$ и $C(x)$. Установим, во-первых, что эти функции *периодические и имеют период* 2π [2]). В самом деле, полагая в (4.15) $x'' = x + 2\pi$ и $x' = x$, получим

$$S(x + 2\pi) - S(x) = 2C(x + \pi)S(\pi).$$

Так как $S(\pi) = S\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}\right) = 2S\left(\frac{\pi}{2}\right) C\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0$, то из последнего соотношения вытекает, что

$$S(x + 2\pi) = S(x),$$

т. е. функция $S(x)$ периодическая и имеет период 2π. Отсюда, в частности, следует, что $S(2\pi) = 0$.

Полагая во второй формуле (4.5$'$) $x' = x$ и $x'' = 2\pi$ и учитывая, что $S(2\pi) = 0$, найдем

$$C(x + 2\pi) = C(x)C(2\pi).$$

Так как $C(2\pi) = 1$ (в этом легко убедиться, применяя формулы (4.5$'$) сначала для $x' = \pi/2$ и $x'' = \pi/2$, а затем для $x' = \pi$ и $x'' = \pi$), то

$$C(x + 2\pi) = C(x).$$

Таким образом, периодичность $C(x)$ также установлена.

Свойство периодичности функций $S(x)$ и $C(x)$ позволяет в наших рассуждениях ограничиться сегментом $[0, 2\pi]$. Мы установим сейчас, какие знаки имеют значения функций $S(x)$ и $C(x)$ в различных точках этого сегмента. Из (4.6$'$), (4.7$'$) и непрерывности $S(x)$ следует, что на сегменте $[0, \pi/2]$ значения функции $S(x)$ неотрицательны, причем на этом сегменте функция $S(x)$ обращается в нуль только в точке $x = 0$. Так как $S(\pi - x) = S(\pi)C(-x) - C(\pi)S(x)$ [3]) и $S(\pi) = 0$, $C(\pi) = -1$, то $S(\pi - x) = S(x)$. Поэтому на сегменте $[\pi/2, \pi]$ значения функции $S(x)$ неотрицательны, причем на этом

---

[1]) Из соотношения $S^2(x) + C^2(x) = 1$ вытекает, что $|C(x)| \leqslant 1$ для всех x, а отсюда вытекает ограниченность последовательности $\left\{C\left(\frac{x + x_n}{2}\right)\right\}$.

[2]) Функция $f(x)$ называется *периодической с периодом* $a > 0$, если для любого x справедливо соотношение $f(x + a) = f(x)$.

[3]) Эта формула вытекает из первой формулы (4.5$'$) и нечетности функции $S(x)$.

сегменте функция $S(x)$ обращается в нуль только в точке $x = \pi$. Из формулы $S(2\pi - x) = -S(x)$, которая может быть получена аналогично формуле $S(\pi - x) = S(x)$, вытекает, что на сегменте $[\pi, 2\pi]$ значения функции $S(x)$ неположительны, причем функция $S(x)$ обращается в нуль лишь на концах этого сегмента. Рассуждая совершенно аналогично, можно убедиться, что функция $C(x)$ неотрицательна на сегментах $[0, \pi/2]$ и $[3\pi/2, 2\pi]$ и неположительна на сегменте $[\pi/2, 3\pi/2]$ и обращается в нуль только в точках $\pi/2$ и $3\pi/2$.

Для завершения доказательства единственности функций $S(x)$ и $C(x)$ нам понадобятся некоторые формулы, к выводу которых мы и переходим. Во-первых, отметим, что из $(4.5')$ вытекают следующие формулы [1]):

$$S^2\left(\frac{x}{2}\right) = \frac{1 - C(x)}{2}, \quad C^2\left(\frac{x}{2}\right) = \frac{1 + C(x)}{2}. \tag{4.17}$$

Полагая в этих формулах $x = x' + x''$ и еще раз применяя формулы $(4.5')$, мы и получим интересующие нас соотношения

$$S^2\left(\frac{x' + x''}{2}\right) = \frac{1 - C(x')C(x'') + S(x')S(x'')}{2},$$
$$C^2\left(\frac{x' + x''}{2}\right) = \frac{1 + C(x')C(x'') - S(x')S(x'')}{2}.$$

Эти формулы показывают, что если известны значения функций $S(x)$ и $C(x)$ в точках x' и x'', то значения этих функций в точке $\dfrac{x' + x''}{2}$ определяются единственным образом, поскольку из приведенных выше рассуждений следует, что нам известны знаки функций $S(x)$ и $C(x)$ в каждой точке сегмента $[0, 2\pi]$, а следовательно, в силу их периодичности с периодом 2π, и в любой точке x числовой прямой. Исходя из известных и единственным образом определенных значений $S(x)$ и $C(x)$ в точках 0, $\pi/2$, π, 2π сегмента $[0, 2\pi]$, мы можем, применяя последовательно только что полученные формулы, вычислить единственным образом значения этих функций во всех точках вида $p\pi/2^n$ сегмента $[0, 2\pi]$ (p и n — целые неотрицательные числа, причем $p \leqslant 2^{n+1}$). Так как множество точек вида $p\pi/2^n$ плотно на сегменте $[0, 2\pi]$, то, в силу сказанного в начале доказательства единственности, функции $S(x)$ и $C(x)$ единственным образом определены на всей числовой прямой.

2. Доказательство существования. Мы докажем более общее утверждение.

Существуют функции $S(x)$ и $C(x)$, определенные и непрерывные на всей числовой прямой, удовлетворяющие требованиям:

$1°$. *Для любых вещественных чисел x', x'' и x выполняются соотношения*

$$\begin{gathered} S(x' + x'') = S(x')C(x'') + C(x')S(x''), \\ C(x' + x'') = C(x')C(x'') - S(x')S(x''), \\ S^2(x) + C^2(x) = 1. \end{gathered} \tag{4.5^1}$$

[1]) Достаточно во второй формуле $(4.5')$ взять $x' = x'' = x/2$, а в третьей формуле $(4.5')$ взять $x/2$ вместо x.

2°.

$$S(0) = 0, \quad C(0) = 1,$$
$$S(d) = 1, \quad C(d) = 0, \tag{4.6^1}$$

где d — некоторое заданное положительное число.

3°. *Существует положительное число L такое, что при $0 < x < d$ справедливы неравенства*

$$0 < S(x) < Lx, \tag{4.7^1}$$

причем, если $d = \pi/2$, то $L = 1$.

Доказательство. Определим, во-первых, значения функций $S(x)$ и $C(x)$ на множестве $\{s\}$ точек сегмента $[0, d]$, каждая из которых может быть представлена в виде $s = \dfrac{pd}{2^n}$, где p и n — целые неотрицательные числа, причем $p < 2^n$. Предварительно мы определим значения этих функций в точках $s_n = \dfrac{d}{2^n}$, $n = 0, 1, \ldots$ Так как $s_{n+1} = \dfrac{s_n}{2}$, то, используя формулы (4.17), можно положить

$$\begin{aligned} S(s_{n+1}) &= S\left(\frac{s_n}{2}\right) = +\sqrt{\frac{1 - C(s_n)}{2}}, \\ C(s_{n+1}) &= C\left(\frac{s_n}{2}\right) = +\sqrt{\frac{1 + C(s_n)}{2}}. \end{aligned} \tag{4.18}$$

Из соотношения $C(d) = C\left(\dfrac{d}{2^0}\right) = C(s_0) = 0$ с помощью рекуррентных формул (4.18) определяются значения $S(x)$ и $C(x)$ во всех точках $s_n = d/2^n$. Дополнительно к указанным значениям $S(x)$ и $C(x)$ в точках s_n мы определим значения этих функций в точках 0 и d так, как это указано в (4.6^1).

Перейдем теперь к определению значений $S(x)$ и $C(x)$ во всех точках множества $\{s\}$, $s = \dfrac{pd}{2^n}$, p и n — целые неотрицательные числа, $p < 2^n$. Известно, что любое целое положительное число может быть единственным образом представлено в виде суммы целых степеней числа 2 [1]):

$$p = \sum_{i=1}^{n} a_i\, 2^{n-i}$$ [2]),

где a_i равно либо нулю, либо единице. Поэтому

$$s = \frac{pd}{2^n} = \sum_{i=1}^{n} \frac{a_i d}{2^i} = \sum_{i=1}^{n} a_i s_i. \tag{4.19}$$

Таким образом, каждое значение s представимо в виде конечной суммы чисел s_i, для каждого из которых значения $S(s_i)$ и $C(s_i)$ определены выше. Мы можем теперь, используя формулы (4.5^1), определить значения $S(x)$

[1]) В двоичной системе счисления целое число p единственным образом представляется в виде символа, состоящего из нулей и единиц. Этот символ и представляет собой краткую запись числа p в виде суммы степеней числа 2.

[2]) См. сноску на с. 60.

и $C(x)$ в точках множества $\{s\}$. При этом мы должны убедиться, что последовательное применение этих формул приводит к одному и тому же результату независимо от способа объединения слагаемых s_i в группы в формуле (4.19).

Например, мы можем положить $s = x' + x''$, где $x' = a_1 s_1$ и $x'' = \sum_{i=2}^{n} a_i s_i$, и затем вычислить $S(s)$ по первой формуле (4.5^1). Но также можно положить $x' = a_1 s_1 + a_2 s_2$ и $x'' = \sum_{i=3}^{n} a_i s_i$. Чтобы убедиться, что последовательное применение формул (4.5^1) будет давать один и тот же результат независимо от способа объединения слагаемых s_i в группы в сумме (4.19), достаточно, чтобы имели место соотношения

$$S[(x' + x'') + x'''] = S[x' + (x'' + x''')]$$

и

$$C[(x' + x'') + x'''] = C[x' + (x'' + x''')].$$

Справедливость этих соотношений устанавливается непосредственно путем двукратного применения формул (4.5^1).

Убедимся теперь, что функции $S(s)$ и $C(s)$, определенные нами на множестве $\{s\}$, обладают свойством 1° на этом множестве. Пусть s', s'' и $s' + s''$ принадлежат указанному множеству. Представим s', s'' и $s' + s''$ в виде сумм (4.19). Объединяя входящие в s' и s'' числа s_n с одинаковыми n до тех пор, пока оставшиеся s_n не будут иметь различные индексы, мы придем к группировке слагаемых s_n, дающей представление (4.19) для числа $s' + s''$. Но выше мы показали, что результат вычисления $S(s)$ или $C(s)$ для суммы нескольких аргументов не зависит от способа группировки слагаемых этой суммы. Следовательно, если s', s'' и $s' + s''$ принадлежат множеству $\{s\}$, то значения $S(s)$ и $C(s)$, вычисленные в этих точках, удовлетворяют первым двум соотношениям (4.5^1). В справедливости третьего соотношения (4.5^1) для указанных значений аргумента убедиться нетрудно. В самом деле, из определения $S(x)$ и $C(x)$ в точках 0 и d следует, что $S^2(0) + C^2(0) = 1$ и $S^2(d) + C^2(d) = 1$. Из рекуррентных формул (4.18) вытекает справедливость соотношения $S^2(s_n) + C^2(s_n) = 1$ для всех s_n, а из непосредственно проверяемой формулы

$$S^2(x' + x'') + C^2(x' + x'') = (S^2(x') + C^2(x'))(S^2(x'') + C^2(x''))$$

следует справедливость соотношения $S^2(s) + C^2(s) = 1$ для всех точек множества $\{s\}$.

Покажем теперь, что для всех точек множества $\{s\}$, отличных от 0 и d, справедливы неравенства

$$0 < S(s) < 1, \qquad 0 < C(s) < 1 \quad {}^{1}). \tag{4.20}$$

Доказательство справедливости неравенств (4.20) проведем по индукции. Для этого каждому n поставим в соответствие группу элементов множества $\{s\}$, относя в эту группу все элементы $\{s\}$, которые можно представить в виде $\frac{pd}{2^n}$, где $0 < p < 2^n$ и p — нечетное число. Элементы этой группы

---

[1]) Напомним, что в точках 0 и d значения $S(s)$ и $C(s)$ определены формулами (4.6^1).

будут называться элементами порядка n. Каждый элемент порядка $n+1$ лежит между двумя последовательными элементами, порядок которых не больше n и которые отличаются друг от друга на $\frac{d}{2^n}$, т. е. на s_n. Первый элемент порядка $n+1$ равен s_{n+1}. Все остальные элементы порядка $n+1$ могут быть получены прибавлением к s_{n+1} различных s порядка n. Вычислим значения $S(s_1)$ и $C(s_1)$ (s_1 — единственное значение s порядка единицы). Имеем из (4.18) $S(s_1) = \sqrt{1/2}$ и $C(s_1) = \sqrt{1/2}$. Таким образом, для элементов первой группы неравенства (4.20) имеют место. Допустим теперь, что неравенства (4.20) имеют место для всех элементов, порядок которых не выше n.

Тогда, в силу первой формулы (4.5^1), значения $S(s)$ во всех точках порядка $n+1$ положительны, а в силу третьей формулы (4.5^1) эти значения не больше единицы. Полагая в первой формуле (4.5^1) $x'' = d$, $x' = -s$ и учитывая четность функции $C(s)$, найдем, что $C(s) = S(d-s)$, и поэтому для $C(s)$ справедливы неравенства (4.20) для значений s порядка $n+1$, так как, если s имеет порядок $n+1$, то и $d-s$ также имеет порядок $n+1$. По индукции отсюда следует, что для всех точек множества $\{s\}$, отличных от 0 и d, справедливы неравенства (4.20).

Докажем, что функции $S(s)$ и $C(s)$, определенные нами на множестве $\{s\}$, монотонны на этом множестве. Именно, покажем, что $S(s)$ — возрастающая функция, а $C(s)$ — убывающая функция. Пусть $0 \leqslant s' < s'' < d$. Тогда $\frac{s'+s''}{2}$ и $\frac{s''-s'}{2}$ заключены строго между нулем и d. Из формулы (4.15) и из неравенств (4.20) следует, что $S(s'') > S(s')$. Следовательно, $S(s)$ — возрастающая функция. Из соотношения $C(s) = S(d-s)$ следует, что $C(s)$ — убывающая на множестве $\{s\}$ функция.

Докажем теперь, что функции $S(s)$ и $C(s)$, определенные на всюду плотном множестве $\{s\}$ точек сегмента $[0,d]$, имеют предельное значение в каждой точке сегмента $[0,d]$.

Рассмотрим, во-первых, последовательность $\{s_n\}$ и покажем, что $\lim\limits_{n\to\infty} S(s_n) = 0$ и $\lim\limits_{n\to\infty} C(s_n) = 1$ (существование этих пределов следует из монотонности и ограниченности $S(s)$ и $C(s)$ на множестве $\{s\}$). Для доказательства рассмотрим последовательность $\left\{\frac{t(s_n)}{s_n}\right\}$, где $t(s_n) = \frac{S(s_n)}{C(s_n)}$. Из (4.18) имеем

$$2S(s_{n+1})C(s_{n+1}) = \sqrt{1-C^2(s_n)} = S(s_n)$$

и

$$C(s_n) = C^2(s_{n+1}) - S^2(s_{n+1}) < C^2(s_{n+1}).$$

Поэтому

$$\frac{t(s_n)}{s_n} = \frac{S(s_n)}{s_nC(s_n)} = \frac{2S(s_{n+1})C(s_{n+1})}{2s_{n+1}C(s_n)} = \frac{t(s_{n+1})}{s_{n+1}}\frac{C^2(s_{n+1})}{C(s_n)} > \frac{t(s_{n+1})}{s_{n+1}}.$$

Итак, $\frac{t(s_n)}{s_n} > \frac{t(s_{n+1})}{s_{n+1}}$ и $\frac{t(s_n)}{s_n} > 0$ при любом n, т. е. последовательность $\left\{\frac{t(s_n)}{s_n}\right\}$ убывающая и ограниченная. По теореме 3.15 она имеет предел, который мы обозначим через L:

$$\lim_{n\to\infty}\frac{t(s_n)}{s_n} = L. \tag{4.21}$$

Так как $s_n \to 0$ при $n \to \infty$, то $\lim\limits_{n\to\infty} t(s_n) = 0$, и поэтому, в силу ограниченности функции $C(s)$ (см. (4.20))

$$\lim_{n\to\infty} S(s_n) = \lim_{n\to\infty} (t(s_n)C(s_n)) = 0. \tag{4.22}$$

Поскольку $C(s) > 0$, из (4.22) и соотношения $S^2(s_n) + C^2(s_n) = 1$ вытекает, что

$$\lim_{n\to\infty} C(s_n) = 1. \tag{4.23}$$

Отметим, что из (4.21) и (4.23) следует, что

$$\lim_{n\to\infty} \frac{S(s_n)}{s_n} = L. \tag{4.24}$$

Так как $\dfrac{S(s_n)}{s_n} = \dfrac{2S(s_{n+1})C(s_{n+1})}{2s_{n+1}} < \dfrac{S(s_{n+1})}{s_{n+1}}$, то последовательность $\left\{\dfrac{S(s_n)}{s_n}\right\}$ возрастает. Поэтому из (4.21) и (4.24) имеем

$$\frac{S(s_n)}{s_n} < L < \frac{t(s_n)}{s_n}$$

или

$$S(s_n) < L \cdot s_n < t(s_n). \tag{4.25}$$

Пусть $\{s_n^*\}$ — любая сходящаяся к нулю последовательность значений s из множества $\{s\}$. Для любого n можно, очевидно, указать такой номер k, что $0 < s_n^* < s_k$. Отсюда, в силу монотонности $S(s)$ на множестве $\{s\}$, имеем $0 < S(s_n^*) < S(s_k)$. Поэтому из (4.22) следует, что $\lim\limits_{n\to\infty} S(s_n^*) = 0$.

Докажем теперь, что функция $S(s)$, определенная на множестве $\{s\}$ [1]), имеет предельное значение в любой точке x сегмента $[0, d]$. Пусть $\{s_n'\}$ — монотонно возрастающая, сходящаяся к x последовательность элементов множества $\{s\}$. Так как $\{S(s_n')\}$ — возрастающая ограниченная последовательность, то существует предел $\lim\limits_{n\to\infty} S(s_n')$, который мы обозначим через $S(x)$. Пусть $\{s_n''\}$ — любая сходящаяся к x последовательность элементов множества $\{s\}$ ($s_n'' \neq x$). Тогда последовательность $\left\{\left|\dfrac{s_n'' - s_n'}{2}\right|\right\}$ имеет предел нуль. Согласно доказанному $\lim\limits_{n\to\infty} S\left(\left|\dfrac{s_n'' - s_n'}{2}\right|\right) = 0$. Из (4.15) и ограниченности функции $C(s)$ имеем

$$\lim_{n\to\infty} |S(s_n'') - S(s_n')| = \lim_{n\to\infty} C\left(\frac{s_n'' + s_n'}{2}\right) S\left(\left|\frac{s_n'' - s_n'}{2}\right|\right) = 0.$$

Иными словами, $\lim\limits_{n\to\infty} S(s_n'') = S(x)$. В силу произвольности последовательности $\{s_n''\}$ это означает существование предельного значения функции $S(s)$, определенной на $\{s\}$, в каждой точке x сегмента $[0, d]$:

$$\lim_{s\to x} S(s) = S(x).$$

Из соотношения $S^2(s) + C^2(s) = 1$ и неотрицательности функции $C(s)$ на множестве $\{s\}$ следует существование предельного значения функции $C(s)$ в каждой точке сегмента $[0, d]$. Мы будем обозначать предельное значение этой функции в точке x символом $C(x)$.

---

[1]) Напомним, что $\{s\}$ — всюду плотное множество точек сегмента $[0, d]$.

Определим теперь значения функций $S(x)$ *и* $C(x)$ *в любой точке* x *сегмента* $[0, d]$ *как предельные значения в точке* x *функций* $S(s)$ *и* $C(s)$, *определенных на множестве* $\{s\}$. Докажем, что так определенные функции $S(x)$ и $C(x)$ обладают свойствами 1° и 2° утверждения, сформулированного в начале *доказательства существования функций* $S(x)$ *и* $C(x)$. Предварительно установим, что определенные указанным выше способом на сегменте $[0, d]$ *функции* $S(x)$ *и* $C(x)$ *монотонны и непрерывны* на этом сегменте. Во-первых, докажем, что если x — любое число из сегмента $[0, d]$, а s' и s'' — любые числа из множества $\{s\}$, удовлетворяющие неравенству $s' < x < s''$, то $S(s') < S(x) < S(s'')$, $C(s') > C(x) > C(s'')$. Установим, например, что $S(s') < S(x)$ (неравенства $S(x) < S(s'')$ и $C(s') > C(x) > C(s'')$ доказываются аналогично). Пусть $\{s'_n\}$ — сходящаяся к x, возрастающая последовательность чисел множества $\{s\}$, все элементы s'_n которой удовлетворяют неравенствам $s' < s'_n < x$. Так как на множестве $\{s\}$ функция $S(s)$ возрастает, то последовательность $\{S(s'_n) - S(s')\}$ возрастает и имеет положительные элементы. Поэтому предел $S(x) - S(s')$ [1] этой последовательности положителен. Таким образом, $S(s') < S(x)$. Докажем теперь, что *функция* $S(x)$ *возрастает на сегменте* $[0, d]$ (доказательство *убывания функции* $C(x)$ *на этом сегменте* проводится аналогично). Пусть x' и x'' — любые два числа сегмента $[0, d]$, удовлетворяющие неравенству $x' < x''$. Если s' — некоторое число множества $\{s\}$, заключенное между x' и x'', $x' < s' < x''$, то по доказанному $S(x') < S(s')$ и $S(s') < S(x'')$, т. е. $S(x') < S(x'')$. Монотонность функции $S(x)$ на $[0, d]$ доказана. *Прежде чем перейти к доказательству непрерывности функций* $S(x)$ *и* $C(x)$, *установим, что предельные значения функций* $S(s)$ *и* $C(s)$ *в точках множества* $\{s\}$ *совпадают со значениями этих функций в соответствующих точках множества* $\{s\}$.

Рассмотрим произвольное число s множества $\{s\}$ и две сходящиеся к s последовательности $\{s'_n\}$ и $\{s''_n\}$ элементов множества $\{s\}$ таких, что $s'_n < s < s''_n$. В силу монотонности функции $S(s)$ на множестве $\{s\}$ справедливы неравенства $S(s'_n) < S(s) < S(s''_n)$ [2]. Так как $\lim\limits_{n\to\infty} S(s'_n) = \lim\limits_{n\to\infty} S(s''_n)$ и указанные пределы равны предельному значению в точке s функции $S(s)$, то только что сформулированное утверждение доказано. Убедимся теперь, что функции $S(x)$ и $C(x)$ *непрерывны в каждой точке сегмента* $[0, d]$. Для этого достаточно установить, что эти функции непрерывны в каждой точке x указанного сегмента слева и справа, непрерывны справа в точке 0 и непрерывны слева в точке d (см. замечание в п. 1 § 3). Докажем ради определенности непрерывность функции $S(x)$ в точке x сегмента $[0, d]$ слева (непрерывность справа и непрерывность $C(x)$ доказывается аналогично).

Пусть $\{s'_k\}$ — некоторая сходящаяся к x слева последовательность чисел множества $\{s\}$. Так как $\lim\limits_{k\to\infty} S(s'_k) = S(x)$, то для любого $\varepsilon > 0$ можно указать элемент s'_k этой последовательности, для которого $0 < S(x) - S(s'_k) < \varepsilon$. Рассмотрим теперь произвольную сходящуюся к x слева последовательность $\{x_n\}$.

Пусть N — номер, начиная с которого выполняются неравенства $s'_k < x_n < x$. В силу возрастания функции при $n \geqslant N$ выполняются неравен-

---

[1]) Поскольку $\lim\limits_{n\to\infty} S(s'_n) = S(x)$, а $S(s')$ – фиксированное число, то $\lim\limits_{n\to\infty} [S(s'_n) - S(s')] = S(x) - S(s')$.

[2]) Ради определенности мы доказываем это утверждение для функции $S(x)$.

ства $S(s'_k) < S(x_n) < S(x)$. Сопоставляя их с неравенствами $0 < S(x) - S(s'_k) < \varepsilon$, получим, что при $n \geqslant N$ справедливы неравенства $0 < S(x) - S(x_n) < \varepsilon$. Иными словами, предельное значение функции $S(x)$ в точке x слева равно частному ее значению в этой точке. Таким образом, непрерывность $S(x)$ в точке x слева доказана.

Определим теперь функции $S(x)$ и $C(x)$ на сегменте $[d, 2d]$ с помощью соотношений $S(x+d) = C(x)$ и $C(x+d) = -S(x)$. Применяя эти формулы еще раз, распространим эти функции на сегмент $[2d, 4d]$. Повторяя эти рассуждения, мы определим эти функции для всех положительных значений x. Для отрицательных значений x мы определим эти функции с помощью соотношений $S(x) = -S(-x)$ и $C(x) = C(-x)$. Легко убедиться, что в результате мы получим функции, непрерывные на всей бесконечной прямой.

Докажем, что функции $S(x)$ и $C(x)$ удовлетворяют требованиям $1°$, $2°$ и $3°$ утверждения, сформулированного в начале *доказательства существования.* Заметим, что если s', s'', $s' + s''$ и s принадлежат множеству $\{s\}$ сегмента$[0, d]$, то для этих значений аргумента формулы (4.5^1) имеют место. Из указанного выше способа продолжения функций $S(x)$ и $C(x)$ следует справедливость этих формул для значений аргумента $d + s'$, s'', где s' и s'' принадлежат сегменту $[0, d]$. Повторяя эти рассуждения, мы докажем, что соотношения (4.5^1) справедливы для всех значений аргумента бесконечной прямой вида $pd/2^n$, где p и n — любые целые числа. Так как эти значения аргумента образуют всюду плотное множество точек бесконечной прямой [1]), то, в силу непрерывности функций $S(x)$ и $C(x)$, соотношения (4.5^1) будут справедливы для всех значений x.

Поскольку требование $2°$ выполнено в результате построения функций $S(x)$ и $C(x)$, остается убедиться в справедливости требования $3°$. Отметим, что если s', s'' и $s' + s''$ — элементы множества $\{s\}$ сегмента $[0, d]$ и справедливы неравенства $0 < S(s') < Ls'$ и $0 < S(s'') < Ls''$, то, в силу первой формулы (4.5^1) и неравенств (4.20), выполняются также неравенства $0 < S(s' + s'') < Ls' + Ls'' = L(s' + s'')$. Используя это замечание, формулу (4.19) и неравенства (4.20) и (4.25), легко убедиться, что неравенства $0 < S(s) < Ls$ справедливы для всех s из множества $\{s\}$ сегмента $[0, d]$. Так как это множество всюду плотно на $[0, d]$, а $S(x)$ — непрерывная функция, то для всех x из $[0, d]$ имеют вместо неравенства $0 < S(x) < Lx$. Справедливость требования $3°$ установлена.

Заметим теперь, что число L зависит от выбора d. Именно, если вместо d выбрать число $d^* = d/k$, то тогда $s_n^* = s_n/k$. По построению $S(s_n^*) = S(s_n)$, и поэтому $\lim\limits_{n\to\infty} \dfrac{S(s_n^*)}{s_n^*} = \lim\limits_{n\to\infty} k\dfrac{S(s_n)}{s_n} = kL$ (см. (4.24)). Выбирая $k = 1/L$, мы определим на сегменте $[0, d^*]$ такие функции $S(x)$ и $C(x)$, что будут выполняться неравенства $0 < S(x) < x$.

Геометрические соображения показывают, что если $d = \pi/2$, то $2S(s_n)$ — длина стороны правильного 2^n-угольника, вписанного в окружность радиуса 1, $2s_n$ — длина дуги окружности, стягиваемой хордой длины $2S(s_n)$, и $2t(s_n)$ — длина стороны правильного 2^n-угольника, описанного вокруг этой окружности. Неравенства (4.25) в этом случае имеют вид $S(s_n) < s_n < t(s_n)$. Поэтому в указанном случае $L = 1$. Утверждение полностью доказано.

---

[1]) См. сноску [2]) на с. 146.

ГЛАВА 5

ОСНОВЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ИСЧИСЛЕНИЯ

В этой главе вводятся понятия производной и дифференциала, устанавливаются правила дифференцирования, вычисляются производные всех простейших элементарных функций, уже выписанные нами в гл. 1. Далее рассматриваются производные и дифференциалы высших порядков.

§ 1. Производная. Ее физическая и геометрическая интерпретация

1. Приращение аргумента и функции. Разностная форма условия непрерывности. Пусть функция $y = f(x)$ определена на некотором интервале[1] (a, b). Фиксируем любое значение x из указанного интервала и зададим аргументу в точке x произвольное приращение Δx такое, что значение $x + \Delta x$ также принадлежит интервалу (a, b). *Приращением функции $y = f(x)$ в точке x, соответствующим приращению аргумента Δx, назовем число*

$$\Delta y = f(x + \Delta x) - f(x). \tag{5.1}$$

Так, для функции $y = \sin x$ приращение в точке x, соответствующее приращению аргумента Δx, равно

$$\Delta y = \sin(x + \Delta x) - \sin x = 2\cos\left(x + \frac{\Delta x}{2}\right)\sin\frac{\Delta x}{2}. \tag{5.2}$$

Имеет место следующее утверждение: *для того чтобы функция $y = f(x)$ являлась непрерывной в точке x, необходимо и достаточно, чтобы приращение Δy этой функции в точке x,*

[1] Вместо интервала (a, b) можно рассматривать сегмент $[a, b]$, полупрямую, всю бесконечную прямую и вообще любое *плотное в себе* множество $\{x\}$. Определение плотного в себе множества $\{x\}$ дано в § 3 гл. 2.

соответствующее приращению аргумента Δx, *являлось бесконечно малым при* $\Delta x \to 0$.

В самом деле, по определению, функция $y = f(x)$ непрерывна в точке x, если существует предельное значение

$$\lim_{\Delta x \to 0} f(x + \Delta x) = f(x). \tag{5.3}$$

В силу п. 3 § 2 гл. 4 существование предельного значения (5.3) эквивалентно тому, что функция $[f(x+\Delta x) - f(x)]$ аргумента Δx является бесконечно малой при $\Delta x \to 0$.

Доказанное утверждение позволяет выразить условие непрерывности функции $y = f(x)$ в точке x в новой форме, а именно: *функция* $y = f(x)$ *непрерывна в точке* x, *если приращение* Δy *этой функции в точке* x, *соответствующее приращению аргумента* Δx, *является бесконечно малым при* $\Delta x \to 0$, т. е. если

$$\lim_{\Delta x \to 0} \Delta y = \lim_{\Delta x \to 0} [f(x + \Delta x) - f(x)] = 0. \tag{5.4}$$

Условие (5.4) мы и будем называть *разностной формой условия непрерывности функции* $y = f(x)$ *в точке* x. Это условие мы будем неоднократно использовать в дальнейшем.

С помощью условия (5.4) еще раз убедимся в том, что функция $y = \sin x$ непрерывна в любой точке x бесконечной прямой. В самом деле, из формулы (5.2), из условия $\left|\cos\left(x + \frac{\Delta x}{2}\right)\right| \leqslant 1$ и из равенства $\lim\limits_{\Delta x \to 0} \sin \frac{\Delta x}{2} = 0$ непосредственно вытекает, что $\lim\limits_{\Delta x \to 0} \Delta y = 0$.

2. Определение производной. Сохраним для функции $y = f(x)$ предположения и обозначения, сформулированные в начале предыдущего пункта.

Считая, что $\Delta x \neq 0$ рассмотрим в данной *фиксированной* точке x отношение приращения Δy функции в этой точке к соответствующему приращению аргумента Δx

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}. \tag{5.5}$$

Отношение (5.5) будем называть *разностным отношением* (в данной точке x). Поскольку значение x мы считаем *фиксированным*, разностное отношение (5.5) представляет собой *функцию аргумента* Δx. Эта функция определена для всех значений аргумента Δx, принадлежащих некоторой достаточно малой окрестности точки $\Delta x = 0$, за исключением самой точки $\Delta x = 0$. Таким образом, мы имеем право рассматривать вопрос о существовании предела указанной функции при $\Delta x \to 0$.

Определение. *Производной функции* $y = f(x)$ *в данной фиксированной точке* x *называется предел при* $\Delta x \to 0$

разностного отношения (5.5) (*при условии, что этот предел существует*).

Производную функции $y = f(x)$ в точке x будем обозначать символом $y'(x)$ или $f'(x)$. Итак, по определению,

$$f'(x) = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}. \tag{5.6}$$

Отметим, что если функция $y = f(x)$ определена и имеет производную для всех x из интервала (a, b), то эта производная будет представлять собой некоторую функцию переменной x, также определенную на интервале (a, b).

3. Производная с физической точки зрения. Понятие производной мы ввели, исходя из физических соображений, еще в гл. 1. Здесь мы еще раз остановимся на физических приложениях понятия производной.

Прежде всего, предположим, что функция $y = f(x)$ описывает *закон движения материальной точки по прямой линии* (т. е. зависимость пути y, пройденного точкой от начала отсчета, от времени x). Тогда, как известно, разностное отношение (5.5) определяет среднюю скорость точки за промежуток времени от x до $x + \Delta x$. В таком случае производная $f'(x)$, т. е. предел разностного отношения (5.5) при $\Delta x \to 0$, определяет *мгновенную скорость точки в момент времени* x. Итак, производная функции, описывающей закон движения, определяет мгновенную скорость точки.

Чтобы не создалось представление о том, что понятие производной широко используется только в механике, приведем примеры приложения понятия производной из других разделов физики.

Пусть функция $y = f(x)$ определяет количество электричества y, протекшего через поперечное сечение проводника за время x. (При этом момент времени $x = 0$ берется за начало отсчета.) В таком случае производная $f'(x)$ будет определять *силу тока*, проходящего через поперечное сечение проводника в момент времени x.

Рассмотрим, далее, процесс нагревания некоторого тела. Предположим, что функция $y = f(x)$ определяет количество тепла[1] y, которое нужно сообщить телу для нагревания этого тела от 0 до $x°$. Тогда, как известно из курса элементарной физики, разностное отношение (5.5) определяет *среднюю теплоемкость* тела при нагревании его от $x°$ до $(x + \Delta x)°$. В таком случае производная $f'(x)$, т. е. предельное значение разностного отношения (5.5) при $\Delta x \to 0$, определяет *теплоемкость тела*

---

[1]) Выраженное, например, в калориях.

при данной температуре x. Подчеркнем, что эта теплоемкость, вообще говоря, меняется с изменением температуры x.

Мы рассмотрели примеры приложения понятия производной в трех разных областях физики. При изучении курса общей физики читатель встретится с другими многочисленными примерами приложения понятия производной.

4. Производная с геометрической точки зрения. В § 2 гл. 1 мы рассматривали задачу о нахождении касательной к кривой, являющейся графиком функции $y = f(x)$ (на некотором интервале (a, b)). Там мы дали определение касательной к указанной кривой в точке $M(x, f(x))$ этой кривой. (Здесь x — некоторое значение аргумента из интервала (a, b); см. рис. 5.1.) Если через Δx обозначить произвольное приращение аргумента, а символом P обозначить точку на кривой с координатами $(x + \Delta x,\ f(x + \Delta x))$, то касательную, проходящую через точку M данной кривой, мы определяем как предельное положение секущей MP при $\Delta x \to 0$. Из рис. 5.1 ясно, что угловой коэффициент секущей MP (т. е. тангенс угла наклона этой секущей к оси Ox) равен разностному отношению (5.5). Из этого факта и из того, что в пределе при $\Delta x \to 0$ угол наклона секущей должен переходить в угол наклона касательной, мы в § 2 гл. 1 сделали основанный на наглядных соображениях вывод о том, что *производная* $f'(x)$ *равна угловому коэффициенту касательной в точке* M *к графику функции* $y = f(x)$.

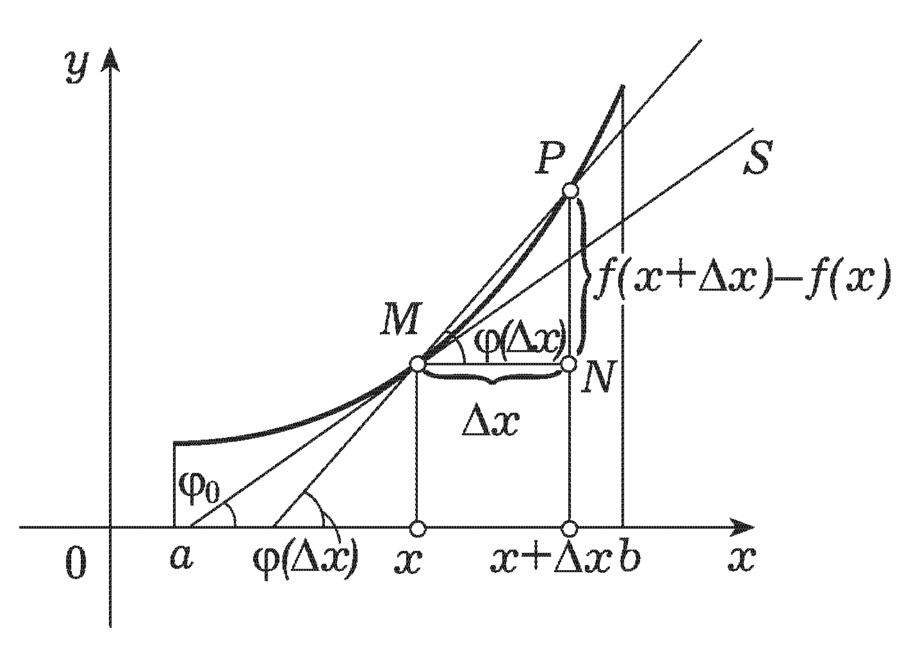


Рис. 5.1

В настоящем пункте мы уточним указанные наглядные соображения. Предположив, что функция $y = f(x)$ имеет производную в данной точке x, мы докажем: 1) что график функции $y = f(x)$ имеет касательную в данной точке $M(x, f(x))$, 2) что угловой коэффициент указанной касательной равен $f'(x)$.

Будем доказывать утверждения 1) и 2) одновременно. Обозначим угол наклона секущей MP к оси Ox символом $\varphi(\Delta x)$. Поскольку угловой коэффициент секущей MP (т. е. $\operatorname{tg}\varphi(\Delta x)$) равен отношению $\dfrac{\Delta y}{\Delta x}$, то

$$\varphi(\Delta x) = \operatorname{arctg}\frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{5.7}$$

при любом достаточно малом Δx, отличном от нуля. Из существования производной $f'(x)$, т. е. из существования предель-

ного значения $\lim\limits_{\Delta x\to 0}\dfrac{\Delta y}{\Delta x} = f'(x)$ и из непрерывности функции $u = \operatorname{arctg} x$ для всех значений аргумента вытекает существование предельного значения функции (5.7) в точке $\Delta x = 0$ и равенство

$$\lim_{\Delta x\to 0}\varphi(\Delta x) = \lim_{\Delta x\to 0}\operatorname{arctg}\frac{\Delta y}{\Delta x} = \operatorname{arctg} f'(x). \qquad (5.8)$$

Равенство (5.8) доказывает существование предельного значения (при $\Delta x \to 0$) угла наклона секущей MP, т. е. доказывает существование касательной к точке M. Кроме того, из равенства (5.8) вытекает, что если обозначить угол наклона касательной через φ_0, то $\varphi_0 = \operatorname{arctg} f'(x)$, т. е. $\operatorname{tg}\varphi_0 = f'(x)$.

5. Правая и левая производные. В полной аналогии с понятиями правого и левого предельных значений функции вводятся понятия *правой* и *левой производных* функции $y = f(x)$ (в данной точке x).

Определение. *Правой (левой) производной функции $y = f(x)$ в данной фиксированной точке x называется правое (левое) предельное значение разностного отношения* (5.5) *в точке $\Delta x = 0$ (при условии, что это предельное значение существует).*

Правую производную функции $y = f(x)$ в точке x обычно обозначают символом $f'(x+0)$, а левую производную в точке x — символом $f'(x-0)$.

Если функция $y = f(x)$ имеет в точке x производную , то она имеет в этой точке и правую, и левую производные, совпадающие между собой. Если функция $y = f(x)$ имеет в точке x и правую, и левую производные и если указанные производные совпадают между собой, то функция $y = f(x)$ имеет в точке x производную[1]. Вместе с тем существуют функции, имеющие в данной точке x и правую, и левую производные, но не имеющие производной в этой точке. Примером такой функции может служить функция

$$f(x) = |x| = \begin{cases} +x, & \text{если } x \geqslant 0,\\ -x, & \text{если } x < 0.\end{cases}$$

Эта функция имеет в точке $x = 0$ правую производную, равную $\lim\limits_{\Delta x\to 0+0}\dfrac{\Delta x}{\Delta x} = 1$, и левую производную, равную $\lim\limits_{\Delta x\to 0-0}\dfrac{-\Delta x}{\Delta x} = -1$, но не имеет в точке $x = 0$ производной.

6. Понятие производной векторной функции. В математическом анализе и его приложениях часто встречаются понятия векторной функции и ее производной.

---

[1]) Это утверждение следует из соответствующего утверждения для правого и левого предельных значений функции (см. замечание из п. 1 § 2 гл. 4).

Если каждому значению переменной t из некоторого множества $\{t\}$ ставится в соответствие по известному закону определенный вектор $\mathbf{a}$, *то говорят, что на множестве $\{t\}$ задана векторная функция* $\mathbf{a} = \mathbf{a}(t)$.

Так как каждый вектор $\mathbf{a}$ в заданной декартовой прямоугольной системе однозначно определяется тремя координатами x, y и z, то задание векторной функции $\mathbf{a} = \mathbf{a}(t)$ эквивалентно заданию трех скалярных функций $x = x(t)$, $y = y(t)$ и $z = z(t)$.

Понятие векторной функции становится особенно наглядным, если обратиться к так называемому *годографу* этой функции.

Годографом называется геометрическое место концов всех векторов $\mathbf{a}(t)$, приложенных к началу координат O. Кривая L на рис. 5.2 представляет собой годограф векторной функции $\mathbf{a} = \mathbf{a}(t)$.

Понятие годографа векторной функции представляет собой обобщение понятия графика скалярной функции.

Введем понятие производной векторной функции $\mathbf{a}(t)$ в данной фиксированной точке t. Для этой цели придадим аргументу t произвольное приращение $\Delta t \neq 0$ и рассмотрим вектор $\Delta\mathbf{a} = \mathbf{a}(t + \Delta t) - \mathbf{a}(t)$ (на рис. 5.2 указанный вектор совпадает с вектором $\overrightarrow{MP}$). Умножив указанный вектор на число $1/\Delta t$, мы получим новый вектор

$$\frac{\Delta\mathbf{a}}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t}[\mathbf{a}(t + \Delta t) - \mathbf{a}(t)], \qquad (5.5^*)$$

коллинеарный прежнему. Вектор (5.5^*) является аналогом разностного отношения (5.5). Отметим, что вектор (5.5^*) представляет собой среднюю скорость изменения векторной функции на сегменте $[t, t + \Delta t]$.

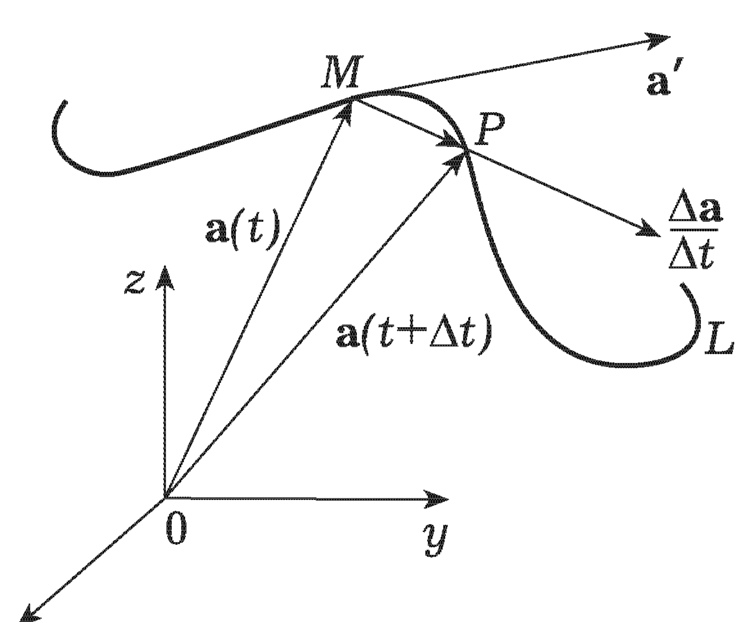


Рис. 5.2

Производной векторной функции $\mathbf{a} = \mathbf{a}(t)$ *в данной фиксированной точке t называется предел при $\Delta t \to 0$ разностного отношения* (5.5^*).

Производная векторной функции $\mathbf{a}(t)$ обозначается символом $\mathbf{a}'(t)$ или $d\mathbf{a}/dt$.

Из геометрических соображений очевидно, что производная векторной функции $\mathbf{a} = \mathbf{a}(t)$ представляет собой вектор, касательный к годографу этой функции.

Так как координаты разностного отношения (5.5^*) соответственно равны

$$\frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t}, \quad \frac{y(t + \Delta t) - y(t)}{\Delta t}, \quad \frac{z(t + \Delta t) - z(t)}{\Delta t},$$

то ясно, что координаты производной $\mathbf{a}'(t)$ равны производным функций $x'(t)$, $y'(t)$, $z'(t)$. Таким образом, вычисление производной векторной функции сводится к вычислению производных ее координат.

З а м е ч а н и е 1. Так как векторная функция $\mathbf{a} = \mathbf{a}(t)$ определяет закон движения материальной точки по кривой L, представляющей собой годограф этой функции, то производная $\mathbf{a}'(t)$ равна скорости движения по указанной кривой.

З а м е ч а н и е 2. Из курса аналитической геометрии известны различные типы произведений векторов (скалярное произведение, векторное

произведение и смешанное произведение). Выражение всех этих произведений в координатах дает возможность указать правила, по которым вычисляются производные соответствующих произведений векторных функций. В качестве примера приведем правило вычисления производной скалярного произведения двух векторных функций $\mathbf{a}(t) = \{a_1(t), a_2(t), a_3(t)\}$ и $\mathbf{b}(t) = \{b_1(t), b_2(t), b_3(t)\}$:

$$\{\mathbf{a}(t)\mathbf{b}(t)\}' = \mathbf{a}'(t)\mathbf{b}(t) + \mathbf{a}(t)\mathbf{b}'(t) = \{a_1'(t)b_1(t) + a_2'(t)b_2(t) + a_3'(t)b_3(t)\} + \{a_1(t)b_1'(t) + a_2(t)b_2'(t) + a_3(t)b_3'(t)\}.$$

Аналогичное правило справедливо и для векторного произведения двух векторных функций:

$$[\mathbf{a}(t)\mathbf{b}(t)]' = [\mathbf{a}'(t)\mathbf{b}(t)] + [\mathbf{a}(t)\mathbf{b}'(t)].$$

§ 2. Понятие дифференцируемости функции

1. Понятие дифференцируемости функции в данной точке. Пусть, как и в пп. 1, 2 предыдущего параграфа, функция $y = f(x)$ определена на некотором интервале (a, b), символом x обозначено некоторое фиксированное значение аргумента из указанного интервала, а символом Δx обозначено любое приращение аргумента, такое, что значение аргумента $x + \Delta x$ также принадлежит (a, b).

Определение. *Функция $y = f(x)$ называется д и ф ф е р е н ц и р у е м о й в данной точке x, если приращение Δy этой функции в точке x, соответствующее приращению аргумента Δx, может быть представлено в виде*

$$\Delta y = A\Delta x + \alpha\Delta x, \tag{5.9}$$

где A — некоторое число, не зависящее от Δx, а α — функция аргумента Δx, являющаяся бесконечно малой при $\Delta x \to 0$.

Заметим, что функция $\alpha(\Delta x)$ может принимать в точке $\Delta x = 0$ *какое угодно значение* (при этом в этой точке остается справедливым представление (5.9)). Ради определенности можно положить $\alpha(0) = 0$ [1]).

Так как произведение двух бесконечно малых $\alpha\Delta x$ является бесконечно малой более высокого порядка, чем Δx (см. п. 3 § 2 гл. 4), т. е. $\alpha\Delta x = o(\Delta x)$, то формулу (5.9) можно переписать в виде

$$\Delta y = A\Delta x + o(\Delta x).$$

Теорема 5.1. *Для того чтобы функция $y = f(x)$ являлась дифференцируемой в данной точке x, необходимо и достаточно, чтобы она имела в этой точке конечную производную.*

---

[1]) При этом частное значение функции $\alpha(\Delta x)$ в точке $\Delta x = 0$ будет совпадать с ее предельным значением в этой точке.

Доказательство. 1) Необходимость. Пусть функция $y = f(x)$ дифференцируема в данной точке x, т. е. ее приращение Δy в этой точке представимо в виде (5.9). Предположив, что $\Delta x \neq 0$ и поделив равенство (5.9) на Δx, получим

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = A + \alpha. \tag{5.10}$$

Из равенства (5.10) вытекает существование производной, т. е. предельного значения $\lim\limits_{\Delta x \to 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = A$.

2) Достаточность. Пусть функция $y = f(x)$ имеет в данной точке x конечную производную, т. е. существует предельное значение

$$\lim_{\Delta x \to 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = f'(x). \tag{5.11}$$

В силу определения предельного значения функция $\alpha = \frac{\Delta y}{\Delta x} - f'(x)$ аргумента Δx является бесконечно малой при $\Delta x \to 0$, т. е.

$$\Delta y = f'(x)\Delta x + \alpha\Delta x, \tag{5.12}$$

где $\lim\limits_{\Delta x \to 0} \alpha = 0$. Представление (5.12) совпадает с представлением (5.9), если обозначить через A не зависящее от Δx число $f'(x)$. Тем самым доказано, что функция $y = f(x)$ дифференцируема в точке x.

Доказанная теорема позволяет нам в дальнейшем *отождествлять понятие дифференцируемости функции в данной точке с понятием существования у функции в данной точке производной.*

Операцию нахождения производной в дальнейшем договоримся называть *дифференцированием.*

2. Связь между понятиями дифференцируемости и непрерывности функции. Имеет место следующее элементарное утверждение.

Теорема 5.2. *Если функция $y = f(x)$ дифференцируема в данной точке x, то она и непрерывна в этой точке.*

Доказательство. Так как функция $y = f(x)$ дифференцируема в точке x, то ее приращение Δy в этой точке может быть представлено в виде (5.9). Но из формулы (5.9) вытекает, что $\lim\limits_{\Delta x \to 0} \Delta y = 0$, т. е. функция $y = f(x)$ непрерывна в точке x в силу разностной формы условия непрерывности (см. п. 1 § 1). Теорема доказана.

Естественно, возникает вопрос о том, справедливо ли утверждение, обратное теореме 5.2, т. е. вытекает ли из непрерывности функции в данной точке ее дифференцируемость в этой

точке. На этот вопрос следует дать отрицательный ответ, ибо существуют функции непрерывные в некоторой точке, но не являющиеся в этой точке дифференцируемыми. Примером такой функции может служить функция $y = |x|$. Очевидно, что эта функция непрерывна в точке $x = 0$, но она (как показано в конце п. 5 § 1) не является дифференцируемой в этой точке. Отметим, что существуют непрерывные на некотором сегменте функции, не имеющие производной ни в одной точке этого сегмента [1]).

3. Понятие дифференциала функции. Пусть функция $y = f(x)$ дифференцируема в точке x, т. е. приращение Δy этой функции в точке x может быть записано в виде (5.9). Анализируя формулу (5.9), мы приходим к выводу, что приращение Δy дифференцируемой функции представляет собой *сумму двух слагаемых*: первое из этих слагаемых $A\Delta x$ при $A \neq 0$ представляет собой функцию приращения аргумента Δx, *линейную и однородную* [2]) *относительно* Δx; это слагаемое представляет собой при $\Delta x \to 0$ *бесконечно малую такого же порядка, что и* Δx; *второе* слагаемое $\alpha\Delta x$ представляет собой при $\Delta x \to 0$ *бесконечно малую более высокого порядка, чем* Δx, так как отношение $\dfrac{\alpha\Delta x}{\Delta x} = \alpha$ стремится к нулю при $\Delta x \to 0$. Таким образом, при $A \neq 0$ первое слагаемое $A\Delta x$ является *главной частью* приращения дифференцируемой функции. Эту главную часть приращения называют дифференциалом функции в точке x, соответствующим приращению аргумента Δx.

Итак, в случае $A \neq 0$ *дифференциалом функции* $y = f(x)$ *в данной точке* x, *соответствующим приращению аргумента* Δx, *называют главную линейную относительно* Δx *часть приращения этой функции в точке* x. Принято обозначать дифференциал функции $y = f(x)$ символом dy. Если для приращения функции Δy справедливо представление (5.9), то дифференциал этой функции, по определению, равен

$$dy = A\Delta x. \tag{5.13}$$

В случае $A = 0$ слагаемое $A\Delta x$ перестает быть главной частью приращения Δy дифференцируемой функции (ибо это слагаемое равно нулю в то время, как слагаемое $\alpha\Delta x$, вообще говоря, отлично от нуля). Однако договариваются и в случае $A = 0$

[1]) Первый опубликованный пример такой функции принадлежит Вейерштрассу. Ранее независимо от него аналогичный пример был построен чешским математиком Больцано, но этот пример не был опубликован. В Дополнении к гл. 11 будет указан пример такой функции.

[2]) Напомним, что *линейной функцией* аргумента x называется функция вида $y = Ax + B$, где A и B — некоторые постоянные. В случае $B = 0$ линейная функция называется *однородной*.

определять дифференциал функции формулой (5.13), т. е. считают, что он равен нулю в этом случае.

Если учесть теорему 5.1, т. е. учесть, что $A = f'(x)$, то формулу (5.13) можно переписать в виде

$$dy = f'(x)\Delta x. \qquad (5.14)$$

Формула (5.14) дает выражение дифференциала функции в точке x, соответствующего приращению аргумента Δx. Следует подчеркнуть, что дифференциал функции dy в данной точке x, вообще говоря, не равен приращению функции Δy в этой точке. Это особенно легко уяснить из рассмотрения графика функции $y = f(x)$ (рис. 5.3). Пусть точка M на кривой $y = f(x)$ соответствует значению аргумента x, точка P на той же кривой соответствует значению аргумента $x + \Delta x$, MS — касательная к кривой $y = f(x)$ в точке M. Пусть далее $MN \parallel Ox$, $PN \parallel Oy$, Q — точка пересечения касательной MS с прямой PN. Тогда приращение функции Δy равно величине отрезка NP. В то же время из прямоугольного треугольника MQN и из формулы (5.14) ясно, что дифференциал функции dy равен величине отрезка NQ, ибо величина отрезка MN равна Δx, а тангенс угла $\angle QMN$ равен $f'(x)$. Очевидно, что величины отрезков NP и NQ, вообще говоря, различны.

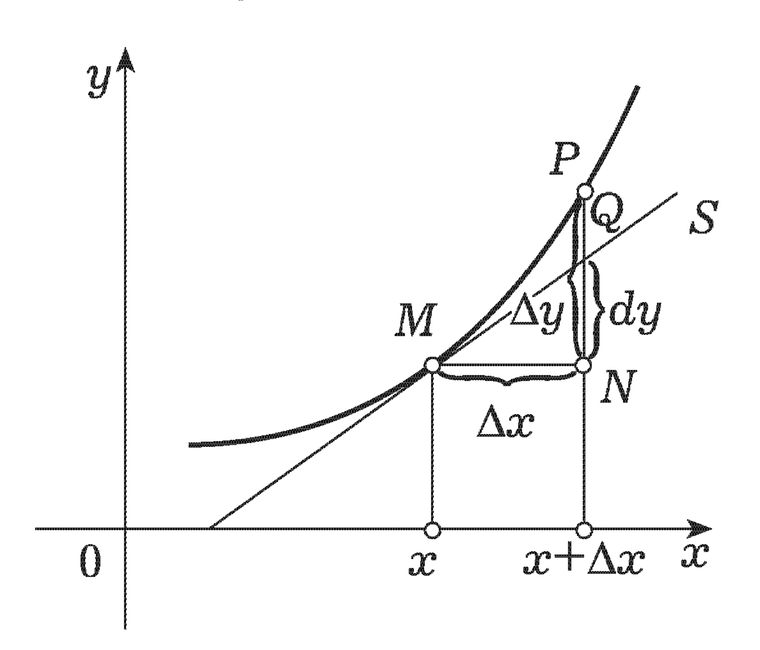


Рис. 5.3

В заключение этого пункта мы установим выражение для дифференциала функции $y = f(x)$, аргумент x которой является *независимой переменной*[1]).

Введем понятие *дифференциала dx независимой переменной x*. Под дифференциалом dx независимой переменной x можно понимать любое (не зависящее от x) число. Договоримся в дальнейшем брать это число равным приращению Δx независимой переменной[2]). Эта договоренность позволяет нам переписать формулу (5.14) в виде

$$dy = f'(x)dx. \qquad (5.15)$$

Подчеркнем, что формула (5.15) пока что установлена нами лишь для случая, когда аргумент x является *независимой переменной*

[1]) Подчеркнем, что аргумент x функции $y = f(x)$, вообще говоря, сам может являться функцией некоторой переменной.

[2]) Эта договоренность оправдывается рассмотрением независимой переменной x как функции вида $y = x$, для которой $dy = dx = \Delta x$.

ременной. Однако ниже, в § 9, мы докажем, что формула (5.15) остается справедливой и для случая, когда аргумент x не является независимой переменной, а сам представляет собой дифференцируемую функцию некоторой новой переменной.

Пока что мы можем сделать следующий вывод из формулы (5.15): для случая, когда аргумент x функции $y = f(x)$ является независимой переменной, производная $f'(x)$ этой функции равна отношению дифференциала функции dy к дифференциалу аргумента dx, т. е.

$$f'(x) = dy/dx.$$

В § 9 будет доказано, что это соотношение справедливо и в случае, когда аргумент x сам является дифференцируемой функцией некоторой новой переменной.

§ 3. Правила дифференцирования суммы, разности, произведения и частного

Теорема 5.3. *Если каждая из функций $u(x)$ и $v(x)$ дифференцируема в данной точке x, то сумма, разность, произведение и частное этих функций (частное при условии, что $v(x) \neq 0$) также дифференцируемы в этой точке, причем имеют место формулы*

$$\begin{gathered} [u(x) \pm v(x)]' = u'(x) \pm v'(x), \\ [u(x)v(x)]' = u'(x)v(x) + u(x)v'(x), \\ \left[\frac{u(x)}{v(x)}\right]' = \frac{u'(x)v(x) - u(x)v'(x)}{v^2(x)}. \end{gathered} \tag{5.16}$$

Доказательство. Рассмотрим отдельно случаи суммы (разности), произведения и частного.

1°. Пусть $y(x) = u(x) \pm v(x)$. Обозначим символами Δu, Δv и Δy приращения функций $u(x)$, $v(x)$ и $y(x)$ в данной точке x, соответствующие приращению аргумента Δx. Тогда, очевидно,

$$\begin{aligned} \Delta y = y(x + \Delta x) - y(x) &= \\ &= [u(x + \Delta x) \pm v(x + \Delta x)] - [u(x) \pm v(x)] = \\ &= [u(x + \Delta x) - u(x)] \pm [v(x + \Delta x) - v(x)] = \Delta u \pm \Delta v. \end{aligned}$$

Таким образом, при $\Delta x \neq 0$

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta u}{\Delta x} \pm \frac{\Delta v}{\Delta x}. \tag{5.17}$$

Пусть теперь $\Delta x \to 0$. Тогда в силу существования производных функций $u(x)$ и $v(x)$ в точке x существует предельное значение правой части (5.17), равное $u'(x) \pm v'(x)$. Стало быть, существует предельное значение (при $\Delta x \to 0$) и левой части (5.17). По

определению производной указанное предельное значение равно $y'(x)$, и мы приходим к требуемому равенству

$$y'(x) = u'(x) \pm v(x).$$

2°. Пусть далее $y(x) = u(x)v(x)$. Сохраняя за Δu, Δv и Δy тот же смысл, что и выше, будем иметь

$$\Delta y = y(x+\Delta x) - y(x) = u(x+\Delta x)v(x+\Delta x) - u(x)v(x) = \\ = [u(x+\Delta x)v(x+\Delta x) - u(x+\Delta x)v(x)] + \\ + [u(x+\Delta x)v(x) - u(x)v(x)]$$

(мы прибавили и вычли слагаемое $u(x+\Delta x)v(x)$). Далее можем записать:

$$\Delta y = u(x+\Delta x)[v(x+\Delta x) - v(x)] + v(x)[u(x+\Delta x) - u(x)] = \\ = u(x+\Delta x)\Delta v + v(x)\Delta u.$$

Таким образом, при $\Delta x \neq 0$

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = u(x+\Delta x)\frac{\Delta v}{\Delta x} + v(x)\frac{\Delta u}{\Delta x}. \tag{5.18}$$

Пусть теперь $\Delta x \to 0$. Тогда в силу дифференцируемости функций $u(x)$ и $v(x)$ в точке x существуют предельные значения отношений $\frac{\Delta u}{\Delta x}$ и $\frac{\Delta v}{\Delta x}$, соответственно равные $u'(x)$ и $v'(x)$. Далее из дифференцируемости $u(x)$ в точке x, в силу теоремы 5.2, следует непрерывность $u(x)$ в этой точке. Стало быть, существует предельное значение $\lim\limits_{\Delta x \to 0} u(x+\Delta x)$, равное $u(x)$. Таким образом, существует предельное значение правой части (5.18) при $\Delta x \to 0$, равное $u(x)v'(x) + v(x)u'(x)$. Стало быть, существует предельное значение (при $\Delta x \to 0$) и левой части (5.18). По определению производной указанное предельное значение равно $y'(x)$, и мы приходим к требуемой формуле

$$y'(x) = u'(x)v(x) + u(x)v'(x).$$

3°. Пусть, наконец, $y(x) = \frac{u(x)}{v(x)}$. Тогда [1])

$$\Delta y = y(x+\Delta x) - y(x) = \frac{u(x+\Delta x)}{v(x+\Delta x)} - \frac{u(x)}{v(x)} = \\ = \frac{u(x+\Delta x)v(x) - v(x+\Delta x)u(x)}{v(x)v(x+\Delta x)}.$$

---

[1]) Так как в дальнейшем в знаменателе фигурирует значение $v(x+\Delta x)$, то следует доказать, что это значение отлично от нуля *для всех достаточно малых* Δx. В самом деле, если бы это было не так, то нашлась бы бесконечно малая последовательность значений Δx_n такая, что $v(x+\Delta x_n) = 0$. Но поскольку функция $v(x)$ непрерывна для значения аргумента x, то мы получили бы из условия $v(x+\Delta x_n) = 0$, что $v(x) = 0$, а это противоречит условию теоремы.

Добавляя и вычитая в числителе слагаемое $u(x)v(x)$, будем иметь:

$$\Delta y = \frac{[u(x+\Delta x)v(x) - u(x)v(x)] - [v(x+\Delta x)u(x) - u(x)v(x)]}{v(x)v(x+\Delta x)} =$$
$$= \frac{v(x)[u(x+\Delta x) - u(x)] - u(x)[v(x+\Delta x) - v(x)]}{v(x)v(x+\Delta x)} = \frac{v(x)\Delta u - u(x)\Delta v}{v(x)v(x+\Delta x)}.$$

Таким образом, при $\Delta x \neq 0$

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{v(x)\dfrac{\Delta u}{\Delta x} - u(x)\dfrac{\Delta v}{\Delta x}}{v(x)v(x+\Delta x)}. \tag{5.19}$$

Пусть теперь $\Delta x \to 0$. В силу дифференцируемости (и вытекающей из нее непрерывности) функций $u(x)$ и $v(x)$ в точке x существуют предельные значения

$$\lim_{\Delta x \to 0} \frac{\Delta u}{\Delta x} = u'(x), \quad \lim_{\Delta x \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta x} = v'(x), \quad \lim_{\Delta x \to 0} v(x+\Delta x) = v(x).$$

Таким образом, поскольку $v(x) \neq 0$, существует предельное значение при $\Delta x \to 0$ правой части (5.19), равное

$$\frac{v(x)u'(x) - v'(x)u(x)}{v^2(x)}.$$

Стало быть, существует предельное значение (при $\Delta x \to 0$) и левой части (5.19). По определению производной указанное предельное значение равно $y'(x)$, и мы получим требуемую формулу

$$y'(x) = \frac{u'(x)v(x) - v'(x)u(x)}{v^2(x)}.$$

Теорема 5.3 полностью доказана.

§ 4. Вычисление производных степенной функции, тригонометрических функций и логарифмической функции

В этом параграфе мы приступим к вычислению производных простейших элементарных функций.

1. Производная степенной функции с целочисленным показателем. Начнем с вычисления производной степенной функции $y = x^n$, показатель n которой является *целым* положительным числом [1]). Случай степенной функции, показатель которой является *любым вещественным* (не обязательно целым) *числом*, отложим до § 8.

[1]) Эта производная уже рассматривалась в гл. 1 с помощью интуитивного представления о пределе.

Используя формулу бинома Ньютона, можем записать:

$$\Delta y = (x + \Delta x)^n - x^n =$$
$$= \left[x^n + nx^{n-1}\Delta x + \frac{n(n-1)}{2}x^{n-2}(\Delta x)^2 + \ldots + (\Delta x)^n\right] - x^n =$$
$$= nx^{n-1}\Delta x + \frac{n(n-1)}{2}x^{n-2}(\Delta x)^2 + \ldots + (\Delta x)^n.$$

Таким образом, при $\Delta x \neq 0$

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = nx^{n-1} + \frac{n(n-1)}{2}x^{n-2}\Delta x + \ldots + (\Delta x)^{n-1}. \tag{5.20}$$

Поскольку все слагаемые в правой части (5.20), начиная со второго, содержат в качестве множителя Δx в положительных степенях, существует предельное значение указанных слагаемых при $\Delta x \to 0$, равное нулю. Первое слагаемое в правой части (5.20) от Δx не зависит. Стало быть, существует предельное значение (при $\Delta x \to 0$) правой части (5.20), равное nx^{n-1}. По определению производной указанное предельное значение равно производной функции $y = x^n$, т. е.

$$(x^n)' = nx^{n-1}.$$

Проведенные рассуждения справедливы для любой точки x бесконечной прямой.

2. Производная функции $y = \sin x$. Пользуясь формулой приведения разности синусов к виду, удобному для логарифмирования, можем записать:

$$\Delta y = \sin(x + \Delta x) - \sin x = 2\cos\left(x + \frac{\Delta x}{2}\right)\sin\frac{\Delta x}{2}.$$

Таким образом, при $\Delta x \neq 0$

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \cos\left(x + \frac{\Delta x}{2}\right)\frac{\sin\frac{\Delta x}{2}}{\frac{\Delta x}{2}}. \tag{5.21}$$

Так как функция $y \cos x$ является *непрерывной* в любой точке x бесконечной прямой [1]), то существует предельное значение

$$\lim_{\Delta x \to 0}\cos\left(x + \frac{\Delta x}{2}\right) = \cos x. \tag{5.22}$$

Далее, в силу основного результата п. 2 § 6 гл. 4, существует предельное значение

$$\lim_{\Delta x \to 0}\frac{\sin\frac{\Delta x}{2}}{\frac{\Delta x}{2}} = 1. \tag{5.23}$$

---

[1]) Это доказано в п. 6 § 5 гл. 4. Впрочем, непрерывность функции $y = \cos x$ легко доказать, используя *разностную форму* условия непрерывности.

Таким образом, существует предельное значение (при $\Delta x \to 0$) правой части (5.21), равное произведению предельных значений (5.22) и (5.23), т. е. равное $\cos x$. По определению производной указанное предельное значение равно производной функции $y = \sin x$, т. е.

$$(\sin x)' = \cos x.$$

Проведенные рассуждения справедливы для любой точки x бесконечной прямой.

3. Производная функции $y = \cos x$. Пользуясь формулой приведения разности косинусов к виду, удобному для логарифмирования, можем записать:

$$\Delta y = \cos(x + \Delta x) - \cos x = -2 \sin\left(x + \frac{\Delta x}{2}\right) \sin\frac{\Delta x}{2}.$$

Таким образом, при $\Delta x \neq 0$

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = -\sin\left(x + \frac{\Delta x}{2}\right) \frac{\sin\dfrac{\Delta x}{2}}{\dfrac{\Delta x}{2}}. \tag{5.24}$$

Так как функция $y = \sin x$ является непрерывной в любой точке x бесконечной прямой, то существует предельное значение

$$\lim_{\Delta x \to 0} \sin\left(x + \frac{\Delta x}{2}\right) = \sin x. \tag{5.25}$$

Из существования предельных значений (5.23) и (5.25) вытекает существование предельного значения (при $\Delta x \to 0$) правой части (5.24), равного $(-\sin x)$. По определению производной последнее предельное значение равно производной функции $y = \cos x$, т. е.

$$(\cos x)' = -\sin x.$$

Проведенные рассуждения справедливы для любой точки x бесконечной прямой.

4. Производные функций $y = \operatorname{tg} x$ и $y = \operatorname{ctg} x$. Так как нами уже вычислены производные функций $y = \sin x$ и $y = \cos x$ и так как

$$\operatorname{tg} x = \frac{\sin x}{\cos x}, \quad \operatorname{ctg} x = \frac{\cos x}{\sin x},$$

то для вычисления производных функций $y = \operatorname{tg} x$ и $y = \operatorname{ctg} x$ можно воспользоваться теоремой 5.3 (точнее, формулой, выражающей производную частного, т. е. третьей из формул (5.16)).

Мы получим, что всюду, кроме тех точек, в которых $\cos x = 0$,

$$(\operatorname{tg} x)' = \frac{(\sin x)' \cos x - (\cos x)' \sin x}{\cos^2 x} = \frac{1}{\cos^2 x}.$$

Итак,

$$(\operatorname{tg} x)' = \frac{1}{\cos^2 x} = 1 + \operatorname{tg}^2 x$$

(для всех значений x, кроме $x = \frac{\pi}{2} + \pi n$, где $n = 0, \pm 1, \dots$). Аналогично всюду, кроме тех точек, в которых $\sin x = 0$,

$$(\operatorname{ctg} x)' = \frac{(\cos x)' \sin x - (\sin x)' \cos x}{\sin^2 x} = -\frac{1}{\sin^2 x}.$$

Итак,

$$(\operatorname{ctg} x)' = -\frac{1}{\sin^2 x} = -(1 + \operatorname{ctg}^2 x)$$

(для всех значений x, кроме $x = \pi n$, где $n = 0, \pm 1, \dots$).

5. Производная функции $y = \log_a x$ $(0 < a \neq 1)$. Взяв в качестве x любую точку полупрямой $x > 0$ и считая, что $|\Delta x| < x$, можем записать:

$$\Delta y = \log_a(x + \Delta x) - \log_a x = \log_a \frac{x + \Delta x}{x} = \log_a \left(1 + \frac{\Delta x}{x}\right).$$

Таким образом, при $\Delta x \neq 0$

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{1}{\Delta x} \log_a \left(1 + \frac{\Delta x}{x}\right) = \log_a \left(1 + \frac{\Delta x}{x}\right)^{1/\Delta x} = \\ = \frac{1}{x} \log_a \left[\left(1 + \frac{\Delta x}{x}\right)^{x/\Delta x}\right]. \qquad (5.26)$$

В силу основного результата п. 3 § 6 гл. 4 выражение в квадратных скобках имеет при $\Delta x \to 0$ (и при любом фиксированном значении x) предельное значение, равное e. Тогда на основании непрерывности функции $y = \log_a x$ в точке $x = e$ существует предельное значение (при $\Delta x \to 0$) правой части (5.26), равное $\frac{1}{x} \log_a e$. По определению производной указанное предельное значение равно производной функции $y = \log_a x$, т. е.

$$(\log_a x)' = \frac{1}{x} \log_a e$$

(для всех значений x, принадлежащих полупрямой $x > 0$). В частном случае $a = e$ получим

$$(\ln x)' = 1/x.$$

§ 5. Теорема о производной обратной функции

Теорема 5.4. *Пусть функция $y = f(x)$ в некоторой окрестности точки x_0 возрастает (или убывает) и является непрерывной. Пусть, кроме того, функция $y = f(x)$ дифференцируема в точке x_0 и производная $f'(x_0)$ отлична от нуля. Тогда существует обратная функция $x = f^{-1}(y)$, которая определена*

в некоторой окрестности соответствующей точки $y_0 = f(x_0)$, *дифференцируема в этой точке и имеет в этой точке производную, равную* $1/f'(x_0)$.

Доказательство. Прежде всего заметим, что для функции $y = f(x)$ выполнены в окрестности точки x_0 все условия следствия из леммы 1 § 4 гл. 4. Согласно этому следствию существует обратная функция $x = f^{-1}(y)$, определенная в некоторой окрестности точки $y_0 = f(x_0)$ и непрерывная в этой окрестности. Придадим аргументу y этой обратной функции в точке y_0 произвольное *отличное от нуля* приращение Δy. Этому приращению отвечает приращение Δx обратной функции, причем в силу возрастания (или убывания) функции $\Delta x \neq 0$. Таким образом, мы имеем право написать следующее тождество:

$$\frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{1}{\Delta y/\Delta x}. \tag{5.27}$$

Пусть теперь в тождестве (5.27) $\Delta y \to 0$. Тогда, в силу непрерывности обратной функции $x = f^{-1}(y)$ в точке y_0 и согласно разностной форме условия непрерывности, и $\Delta x \to 0$.

Но при $\Delta x \to 0$ знаменатель дроби, стоящей в правой части (5.27), по определению производной, имеет предельное значение, равное $f'(x) \neq 0$. Стало быть, правая часть (5.27) имеет при $\Delta y \to 0$ предельное значение, равное $\frac{1}{f'(x_0)}$. Но тогда и левая часть (5.27) имеет при $\Delta y \to 0$ предельное значение. По определению производной указанное предельное значение равно[1] $\{f^{-1}(y_0)\}'$. Таким образом, мы доказали дифференцируемость обратной функции в точке y_0 и получили для ее производной соотношение

$$\{f^{-1}(y_0)\}' = \frac{1}{f'(x_0)}. \tag{5.28}$$

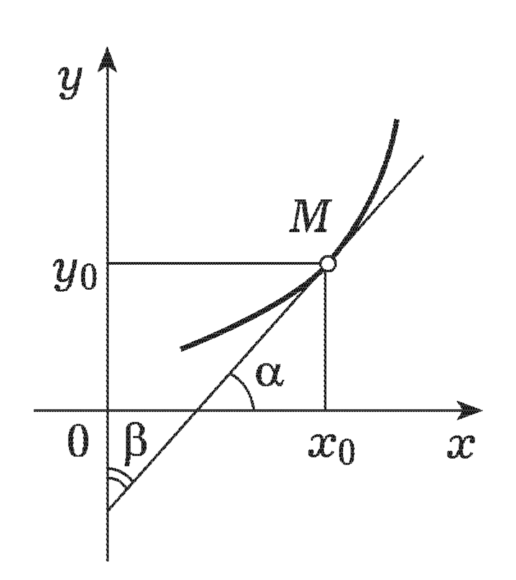


Рис. 5.4

Теорема 5.4 доказана.

Доказанная теорема имеет простой геометрический смысл. Рассмотрим в окрестности точки x_0 график функции $y = f(x)$ (или обратной функции). Предположим, что точке x_0 на этом графике соответствует точка M (рис. 5.4). Тогда, очевидно, производная $f'(x_0)$ равна тангенсу угла наклона α касательной, проходящей через точку M, к оси Ox. Производная обратной функции $\{f^{-1}(y_0)\}'$ равна тан-

[1]) Символом $\{f^{-1}(y_0)\}'$ мы обозначаем производную обратной функции в точке y_0.

генсу угла наклона β той же касательной к оси Oy. Поскольку углы α и β в сумме составляют $\pi/2$, то формула (5.28) выражает очевидный факт:

$$\operatorname{tg}\beta = 1/\operatorname{tg}\alpha.$$

§ 6. Вычисление производных показательной функции и обратных тригонометрических функций

В этом параграфе, опираясь на доказанную выше теорему 5.4, мы продолжим вычисление производных простейших элементарных функций.

1. Производная показательной функции $y = a^x$ $(0 < a \neq 1)$. Показательная функция $y = a^x$, будучи определена на бесконечной прямой, служит обратной для логарифмической функции $x = \log_a y$, определенной на полупрямой $y > 0$. Поскольку для логарифмической функции в окрестности любой точки y полупрямой $y > 0$ выполнены все условия теоремы 5.4, то, согласно этой теореме, функция $y = a^x$ дифференцируема в любой точке $x = \log_a y$ и для ее производной справедлива формула

$$(a^x)' = \frac{1}{(\log_a y)'} = \frac{1}{\frac{1}{y}\log_a e} = \frac{y}{\log_a e}.$$

Из этой формулы, воспользовавшись известным из элементарного курса соотношением $\log_a b = \dfrac{1}{\log_b a}$ и учитывая, что $y = a^x$, окончательно получим

$$(a^x)' = a^x \ln a.$$

Полученная формула справедлива для всех точек x бесконечной прямой. В частном случае $a = e$ эта формула принимает вид

$$(e^x)' = e^x.$$

2. Производные обратных тригонометрических функций. Начнем с вычисления производной функции $y = \arcsin x$. Эта функция, будучи определена на интервале $-1 < x < +1$, служит обратной для функции $x = \sin y$, определенной на интервале $-\frac{\pi}{2} < y < +\frac{\pi}{2}$. Поскольку для функции $x = \sin y$ в окрестности любой точки y интервала $-\frac{\pi}{2} < y < \frac{\pi}{2}$ выполнены все условия теоремы 5.4, то, согласно этой теореме, функция $y = \arcsin x$ дифференцируема в любой точке $x = \sin y$ и для ее производной справедлива формула

$$(\arcsin x)' = \frac{1}{(\sin y)'} = \frac{1}{\cos y} = \frac{1}{\sqrt{1-\sin^2 y}}. \qquad (5.29)$$

Мы взяли перед корнем знак $+$, ибо $\cos y$ положителен всюду на интервале $-\frac{\pi}{2} < y < \frac{\pi}{2}$. Учитывая, что $\sin y = x$, из формулы (5.29) окончательно получим

$$(\arcsin x)' = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}.$$

Полученная формула, как уже отмечалось в процессе ее вывода, справедлива для всех x из интервала $-1 < x < +1$. По аналогичной схеме вычисляется производная функции $y = \arccos x$. Эта функция, будучи определена на интервале $-1 < x < +1$, служит обратной для функции $x = \cos y$, определенной на интервале $0 < y < \pi$. Поскольку для функции $x = \cos y$ в окрестности любой точки y интервала $0 < y < \pi$ выполнены все условия теоремы 5.4, то, согласно этой теореме, функция $y = \arccos x$ дифференцируема в любой точке $x = \cos y$ и для ее производной справедлива формула

$$(\arccos x)' = \frac{1}{(\cos y)'} = -\frac{1}{\sin y} = -\frac{1}{\sqrt{1-\cos^2 y}}. \qquad (5.30)$$

Мы учли, что $\sin y = +\sqrt{1-\cos^2 y}$ ибо $\sin y > 0$ всюду на интервале $0 < y < \pi$. Принимая во внимание, что $\cos y = x$, из формулы (5.30) окончательно найдем

$$(\arccos x)' = -\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}.$$

Полученная формула, как уже отмечалось в процессе ее вывода, справедлива для всех значений x из интервала $-1 < x < 1$.

Перейдем к вычислению производной функции $y = \operatorname{arctg} x$. Эта функция, будучи определена на бесконечной прямой $-\infty < < x < +\infty$, служит обратной для функции $x = \operatorname{tg} y$, определенной на интервале $-\frac{\pi}{2} < y < \frac{\pi}{2}$. Поскольку для функции $x = \operatorname{tg} y$ в окрестности любой точки y интервала $-\frac{\pi}{2} < y < \frac{\pi}{2}$ выполнены все условия теоремы 5.4, то, согласно этой теореме, функция $y = \operatorname{arctg} x$ дифференцируема в любой точке $x = \operatorname{tg} y$ и для ее производной справедлива формула

$$(\operatorname{arctg} x)' = \frac{1}{(\operatorname{tg} y)'} = \frac{1}{1+\operatorname{tg}^2 y}.$$

Учитывая, что $\operatorname{tg} y = x$, окончательно получим

$$(\operatorname{arctg} x)' = \frac{1}{1+x^2}.$$

Полученная формула справедлива для всех точек x бесконечной прямой.

Остается вычислить производную функции $y = \operatorname{arcctg} x$. Эта функция, будучи определена на бесконечной прямой $-\infty < x < +\infty$, служит обратной для функции $x = \operatorname{ctg} y$, определенной на интервале $0 < y < \pi$. Поскольку для функции $x = \operatorname{ctg} y$ в окрестности любой точки y интервала $0 < y < \pi$ выполнены все условия теоремы 5.4, то, согласно этой теореме, функция $y = \operatorname{arcctg} x$ дифференцируема в любой точке $x = \operatorname{ctg} y$ и для ее производной справедлива формула

$$(\operatorname{arcctg} x)' = \frac{1}{(\operatorname{ctg} y)'} = -\frac{1}{1+\operatorname{ctg}^2 y}.$$

Учитывая, что $\operatorname{ctg} y = x$, окончательно получим

$$(\operatorname{arcctg} x)' = -\frac{1}{1+x^2}.$$

Эта формула справедлива для всех точек x бесконечной прямой.

Таким образом, мы вычислили производные всех простейших элементарных функций, за исключением степенной функции с любым вещественным показателем.

Откладывая вычисление производной этой последней функции до § 8, займемся обоснованием правила дифференцирования сложной функции.

§ 7. Правило дифференцирования сложной функции

Целью настоящего параграфа является установление правила, позволяющего найти производную сложной функции $y = f[\varphi(t)]$, если известны производные составляющих ее функций $y = f(x)$ и $x = \varphi(t)$.

Теорема 5.4. *Пусть функция $x = \varphi(t)$ дифференцируема в некоторой точке t_0, а функция $y = f(x)$ дифференцируема в соответствующей точке $x_0 = \varphi(t_0)$. Тогда сложная функция $f[\varphi(t)]$ дифференцируема в указанной точке t_0, причем для производной этой функции справедлива следующая формула*[1]:

$$\{f[\varphi(t_0)]\}' = f'(x_0)\varphi'(t_0). \tag{5.31}$$

Доказательство. Придадим аргументу t в точке t_0 произвольное, *отличное от нуля* приращение Δt. Этому приращению соответствует приращение Δx функции $x = \varphi(t)$. Приращению Δx в свою очередь соответствует приращение Δy функции $y = f(x)$ в точке x_0. Поскольку функция $y = f(x)$ предполагается дифференцируемой в точке x_0, приращение этой функции в точке x_0 может быть записано в виде (см. § 2)

$$\Delta y = f'(x_0)\Delta x + \alpha\Delta x, \tag{5.32}$$

[1]) Символом $\{f[\varphi(t_0)]\}'$ мы обозначаем производную сложной функции $y = f[\varphi(t)]$ в точке $t = t_0$.

где
$$\lim_{\Delta x\to 0} \alpha = 0.$$
Поделив равенство (5.32) на Δt, будем иметь
$$\frac{\Delta y}{\Delta t} = f'(x_0)\frac{\Delta x}{\Delta t} + \alpha\frac{\Delta x}{\Delta t}. \tag{5.33}$$
Пусть теперь в равенстве (5.33) $\Delta t \to 0$. Так как из дифференцируемости функций $x = \varphi(t)$ в точке t_0 вытекает непрерывность этой функции в точке t_0, то, в силу разностной формы условия непрерывности, $\Delta x \to 0$ (при $\Delta t \to 0$). Поэтому можно утверждать, что существует предельное значение
$$\lim_{\Delta t\to 0} \alpha = 0. \tag{5.34}$$
Кроме того, в силу требования дифференцируемости функции $x = \varphi(t)$ в точке t_0 существует предельное значение
$$\lim_{\Delta t\to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \varphi'(t_0). \tag{5.35}$$
Существование предельных значений (5.34) и (5.35) обеспечивает существование предельного значения (при $\Delta t \to 0$) всей правой части (5.33), равного $f'(x_0)\varphi'(t_0)$. Стало быть, существует предельное значение (при $\Delta t \to 0$) и левой части (5.33). По определению производной указанное предельное значение равно производной сложной функции $f[\varphi(t)]$ в точке t_0. Тем самым нами доказана дифференцируемость сложной функции в точке t_0 и установлена формула (5.31).

Теорема 5.5 доказана.

З а м е ч а н и е. Мы рассматривали сложную функцию $y = f(x)$, где $x = \varphi(t)$, т. е. брали x в качестве промежуточного аргумента, а t в качестве окончательного аргумента. Эти обозначения, конечно, могут быть изменены. Часто удобнее бывает рассматривать сложную функцию вида $y = f(u)$, где $u = \varphi(x)$, т. е. брать x в качестве окончательного аргумента, а некоторую переменную u в качестве промежуточного. Для этой функции формула дифференцирования (5.31) принимает вид
$$y' = \{f[\varphi(x)]\}' = f'(u)\varphi'(x) \tag{5.36}$$
(мы опустили у соответствующих значений аргументов x и u нули, имевшие вспомогательный характер).

Приведем примеры использования только что доказанного правила дифференцирования сложной функции.

1°. Вычислить производную функции $y = e^{\operatorname{arctg} x}$. Эту функцию будем рассматривать как сложную функцию вида $y = e^u$, где $u = \operatorname{arctg} x$. Используя формулу (5.36), получим
$$y' = (e^u)'(\operatorname{arctg} x)' = e^u\frac{1}{1+x^2} = e^{\operatorname{arctg} x}\frac{1}{1+x^2}.$$

2°. Вычислить производную функции $y = 2^{x^2}$. Эту функцию будем рассматривать как сложную функцию вида $y = 2^u$, где $u = x^2$. Используя формулу (5.36), получим

$$y' = (2^u)'(x^2)' = (2^u \ln 2)2x = 2^{x^2+1} x \ln 2.$$

3°. При рассмотрении указанных двух примеров мы отдельно выписывали функции, составляющие данную сложную функцию. В этом, конечно, нет никакой необходимости, и на практике дифференцирование сложной функции производится сразу без расчленения на отдельные составляющие функции. Например,

$$y = \arcsin 75x, \quad y' = \frac{1}{\sqrt{1-(75x)^2}}(75x)' = \frac{75}{\sqrt{1-(75x)^2}}$$

(здесь $|x| < 1/75$).

4°. Теорема 5.5 и содержащееся в ней правило последовательно переносятся и на случай сложной функции, являющейся суперпозицией трех и большего числа функций.

Рассмотрим пример такой функции. Пусть требуется вычислить производную функции $y = 5^{\operatorname{arcctg}(x^8)}$. Последовательно применяя правило дифференцирования сложной функции, получим

$$y = (5^{\operatorname{arcctg}(x^8)} \ln 5)\frac{(-1)}{1+x^{16}} 8x^7.$$

§ 8. Логарифмическая производная. Производная степенной функции с любым вещественным показателем. Таблица производных простейших элементарных функций

1. Понятие логарифмической производной функции. Пусть функция $y = f(x)$ *положительна* и дифференцируема в данной точке x. Тогда в этой точке существует $\ln y = \ln f(x)$. Рассматривая $\ln f(x)$ как сложную функцию аргумента x, мы можем вычислить производную этой функции в данной точке x, принимая $y = f(x)$ за промежуточный аргумент. Получим

$$[\ln f(x)]' = y'/y. \tag{5.37}$$

Величина, определяемая формулой (5.37), называется *логарифмической производной* функции $y = f(x)$ в данной точке x. В качестве примера вычислим логарифмическую производную так называемой степенно-показательной функции $y = u(x)^{v(x)}$. Мы уже знаем из п. 2 § 7 гл. 4, что эта функция определена и непрерывна для всех значений x, для которых $u(x)$ и $v(x)$ непрерывны и $u(x) > 0$. Теперь мы дополнительно потребуем, чтобы $u(x)$ и $v(x)$ были дифференцируемы для рассматриваемых

значений x. Тогда, поскольку $\ln y = v(x)\ln u(x)$, мы получим, что логарифмическая производная рассматриваемой функции равна

$$\frac{y'}{y} = [v(x)\ln u(x)]' = v'(x)\ln u(x) + v(x)\frac{u'(x)}{u(x)}. \tag{5.38}$$

Из равенства (5.38), учитывая, что $y = u(x)^{v(x)}$, получим следующую формулу для производной степенно-показательной функции:

$$y' = u(x)^{v(x)}\left[v'(x)\ln u(x) + v(x)\frac{u'(x)}{u(x)}\right].$$

2. Производная степенной функции с любым вещественным показателем. Приступим теперь к вычислению производной степенной функции $y = x^{\alpha}$ с произвольным вещественным показателем α. Мы будем вычислять производную этой функции для тех значений x, для которых эта функция определена при любом α, а именно для значений x, принадлежащих полупрямой [1] $x > 0$. Имея в виду, что всюду на полупрямой $x > 0$ функция $y = x^{\alpha}$ *положительна*, вычислим логарифмическую производную этой функции. Так как $\ln y = \alpha\ln x$, то логарифмическая производная равна

$$\frac{y'}{y} = [\alpha\ln x]' = \frac{\alpha}{x}.$$

Отсюда, учитывая, что $y = x^{\alpha}$, получим формулу для производной степенной функции

$$(x^{\alpha})' = \alpha x^{\alpha-1}.$$

Таким образом, нами вычислены производные всех простейших элементарных функций. Собирая воедино все вычисленные производные, мы получим следующую таблицу, уже выписанную нами в гл. 1.

3. Таблица производных простейших элементарных функций.

1°. $(x^{\alpha})' = \alpha x^{\alpha-1}$. В частности, $\left(\frac{1}{x}\right)' = -\frac{1}{x^2}$, $(\sqrt{x})' = \left(\frac{1}{2\sqrt{x}}\right)$.

2°. $(\log_a x)' = \frac{1}{x}\log_a e$ $(x > 0, 0 < a \neq 1)$. В частности, $(\ln x)' = \frac{1}{x}$.

3°. $(a^x)' = a^x\ln a$ $(0 < a \neq 1)$. В частности, $(e^x)' = e^x$.

4°. $(\sin x)' = \cos x$.

---

[1] В случае, когда $\alpha = 1/m$, где m — целое нечетное число, функция $y = x^{\alpha}$ определена *на всей бесконечной прямой*. Однако и в этом случае достаточно вычислить производную указанной функции лишь для значений $x > 0$, ибо указанная функция является *нечетной* и ее производную для значений $x < 0$ легко получить из этого соображения.

5°. $(\cos x)' = -\sin x$.

6°. $(\operatorname{tg} x)' = \dfrac{1}{\cos^2 x} = 1 + \operatorname{tg}^2 x$ $\left(x \neq \dfrac{\pi}{2} + \pi n\right.$, где $\left. n = 0, \pm 1, \ldots\right)$.

7°. $(\operatorname{ctg} x)' = -\dfrac{1}{\sin^2 x} = -(1 + \operatorname{ctg}^2 x)$ $(x \neq \pi n$, где $n = 0, \pm 1, \ldots)$.

8°. $(\arcsin x)' = \dfrac{1}{\sqrt{1 - x^2}}$ $(-1 < x < 1)$.

9°. $(\arccos x)' = -\dfrac{1}{\sqrt{1 - x^2}}$ $(-1 < x < 1)$.

10°. $(\operatorname{arctg} x)' = \dfrac{1}{1 + x^2}$.

11°. $(\operatorname{arcctg} x)' = -\dfrac{1}{1 + x^2}$.

В § 4 гл. 4 мы ввели гиперболические функции $y = \operatorname{sh} x$, $y = \operatorname{ch} x$, $y = \operatorname{th} x$ и $y = \operatorname{cth} x$, которые являются простыми комбинациями показательных функций. Из определения этих функций элементарно вытекают следующие выражения для их производных:

12°. $(\operatorname{sh} x)' = \operatorname{ch} x$.

13°. $(\operatorname{ch} x)' = \operatorname{sh} x$.

14°. $(\operatorname{th} x)' = \dfrac{1}{\operatorname{ch}^2 x}$.

15°. $(\operatorname{cth} x)' = -\dfrac{1}{\operatorname{sh}^2 x}$ $(x \neq 0)$.

Указанная таблица вместе с правилами дифференцирования суммы, разности, произведения и частного (т. е. формулами (5.16)) и правилом дифференцирования сложной функции составляет основу дифференциального исчисления.

Установленные правила и формулы дифференцирования позволяют сделать один важный вывод.

В § 7 гл. 4 мы ввели понятие *элементарной функции* как такой функции, которая выражается через простейшие элементарные функции посредством четырех арифметических действий и суперпозиций, последовательно примененных конечное число раз. Теперь мы можем утверждать, что *производная любой элементарной функции представляет собой также элементарную функцию.* Таким образом, *операция дифференцирования не выводит нас из класса элементарных функций.*

§ 9. Инвариантность формы первого дифференциала. Некоторые применения дифференциала

1. Инвариантность формы первого дифференциала. В конце § 2 мы установили, что для случая, когда аргумент x является *независимой переменной*, дифференциал функции $y =$

$= f(x)$ определяется формулой

$$dy = f'(x)dx. \tag{5.39}$$

В этом пункте мы докажем, что формула (5.39) является универсальной и справедлива не только в случае, когда аргумент x является независимой переменной, но и в случае, когда аргумент x сам является дифференцируемой функцией некоторой новой переменной t. Указанное свойство дифференциала функции обычно называют *инвариантностью его формы*.

Итак, пусть дана дифференцируемая в некоторой точке x функция $y = f(x)$, аргумент x которой представляет собой дифференцируемую функцию $x = \varphi(t)$ аргумента t. В таком случае мы можем рассматривать y *как сложную функцию* $y = f[\varphi(t)]$ аргумента t, а x как промежуточный аргумент. В силу теоремы 5.5 производная y по t определяется формулой

$$y' = f'(x)\varphi'(t). \tag{5.40}$$

Поскольку переменную t мы можем рассматривать как *независимую*, производные функций $x = \varphi(t)$ и $y = f[\varphi(t)]$ по аргументу t, согласно установленному в конце § 2, равны отношению дифференциалов этих функций к dt, т. е.

$$\varphi'(t) = \frac{dx}{dt}, \quad y' = \{f[\varphi(t)]\}' = \frac{dy}{dt}.$$

Вставляя эти значения производных в формулу (5.40), придадим этой формуле вид

$$\frac{dy}{dt} = f'(x)\frac{dx}{dt}. \tag{5.41}$$

Умножая обе части равенства (5.41) на dt, получим для dy выражение (5.39). Тем самым доказана инвариантность формы первого дифференциала функции, т. е. доказано, что *как в случае, когда аргумент x является независимой переменной, так и в случае, когда аргумент x сам является дифференцируемой функцией другой переменной, дифференциал dy функции $y = f(x)$ равен производной этой функции, умноженной на дифференциал аргумента dx.*

По-другому свойство инвариантности дифференциала можно сформулировать так: *производная функции $y = f(x)$ всегда*[1] *равна отношению дифференциала этой функции dy к дифференциалу аргумента dx, т. е.*

$$f'(x) = \frac{dy}{dx}. \tag{5.42}$$

[1] То есть как в случае, когда аргумент x является независимой переменной, так и в случае, когда x сам является дифференцируемой функцией некоторой другой переменной.

Доказанное равенство (5.42) позволяет нам в дальнейшем использовать отношение $\frac{dy}{dx}$ для обозначения производной функции $y = f(x)$ по аргументу x.

Заметим в заключение, что после того, как доказано равенство (5.42), правило дифференцирования сложной функции принимает вид простого тождества:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{dy}{dx}\frac{dx}{dt}. \tag{5.43}$$

Столь же простой вид приобретает правило дифференцирования обратной функции:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{dx/dy}. \tag{5.44}$$

Подчеркнем, однако, что равенства (5.43) и (5.44) нельзя рассматривать как новые методы доказательства теорем 5.5 и 5.4, ибо формулы (5.43) и (5.44) существенно используют факт инвариантности первого дифференциала, установленный нами именно при помощи теоремы 5.5.

2. Формулы и правила вычисления дифференциалов. Мы доказали, что дифференциал dy функции $y = f(x)$ всегда равен производной этой функции $f'(x)$, умноженной на дифференциал аргумента dx. Таким образом, таблица производных, выписанная нами в п. 3 § 8, приводит к соответствующей таблице дифференциалов:

1°. $d(x^\alpha)=\alpha x^{\alpha-1}dx$. В частности, $d\left(\frac{1}{x}\right) = -\frac{dx}{x^2}$, $d(\sqrt{x}) = \frac{dx}{2\sqrt{x}}$.

2°. $d(\log_a x) = \frac{\log_a e}{x}dx$ $(x > 0,\ 0 < a \neq 1)$. В частности, $d(\ln x) = \frac{dx}{x}$.

3°. $d(a^x) = a^x \ln a dx$ $(0 < a \neq 1)$. В частности, $d(e^x) = e^x dx$.

4°. $d(\sin x) = \cos x dx$.

5°. $d(\cos x) = -\sin x dx$.

6°. $d(\operatorname{tg} x) = \frac{dx}{\cos^2 x} = (1+\operatorname{tg}^2 x)dx$ $\left(x \neq \frac{\pi}{2} + \pi n,\right.$ где $n = 0, \pm 1, \left.\ldots\right)$.

7°. $d(\operatorname{ctg} x) = -\frac{dx}{\sin^2 x} = -(1 + \operatorname{ctg}^2 x)dx$ $(x \neq \pi n$, где $n = 0, \pm 1, \ldots)$.

8°. $d(\arcsin x) = \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}}$ $(-1 < x < 1)$.

9°. $d(\arccos x) = -\frac{dx}{\sqrt{1-x^2}}$ $(-1 < x < 1)$.

10°. $d(\operatorname{arctg} x) = \frac{dx}{1+x^2}$.

11°. $d(\operatorname{arcctg} x) = -\frac{dx}{1+x^2}$.

Из формул (5.16) и из соотношения (5.39) непосредственно вытекают следующие правила для вычисления дифференциала суммы, разности, произведения и частного:

$$d(u \pm v) = du \pm dv, \quad d(uv) = vdu + udv, \quad d\left(\frac{u}{v}\right) = \frac{vdu - udv}{v^2}.$$

3. Использование дифференциала для установления приближенных формул. Хотя, как мы видели в § 2, дифференциал dy функции $y = f(x)$ не равен приращению Δy этой функции, но с точностью до бесконечно малой более высокого порядка, чем Δx, справедливо приближенное равенство

$$\Delta y \approx dy. \tag{5.45}$$

Относительная [1]) погрешность этого равенства становится сколь угодно малой при достаточно малом Δx. Формула (5.45) позволяет приближенно заменить приращение Δy функции $y = f(x)$ ее дифференциалом dy. Преимущество такой замены состоит в том, что дифференциал dy зависит от Δx линейно, в то время как приращение Δy, вообще говоря, представляет собой более сложную функцию от Δx.

Имея в виду, что приращение функции Δy определяется формулой (5.1), а дифференциал dy определяется формулой (5.14), мы придадим приближенному равенству (5.45) следующий вид:

$$f(x + \Delta x) - f(x) \approx f'(x)\Delta x$$

или

$$f(x + \Delta x) \approx f(x) + f'(x)\Delta x. \tag{5.46}$$

По формуле (5.46) функция f для значений аргумента, близких к x (т. е. для малых Δx), приближенно заменяется линейной функцией.

В частности, из формулы (5.46) может быть получен ряд уже известных нам из гл. 4 приближенных формул. Так, полагая $f(x) = (1 + x)^{1/n}$, $x = 0$, получим, что

$$(1 + \Delta x)^{1/n} \approx 1 + \frac{\Delta x}{n}. \tag{5.47}$$

Полагая $f(x) = \sin x$, $x = 0$, получим

$$\sin \Delta x \approx \Delta x. \tag{5.48}$$

Полагая, $f(x) = e^n$, $x = 0$, получим

$$e^{\Delta x} \approx 1 + \Delta x. \tag{5.49}$$

---

[1]) Относительная погрешность равенства (5.45) определяется отношением $\dfrac{\Delta y - dy}{\Delta x}$. Отметим, что, по определению дифференциала, $\Delta y - dy = o(\Delta x)$.

Полагая $f(x) = \ln(1+x)$, $x = 0$, получим

$$\ln(1+\Delta x) \approx \Delta x. \tag{5.50}$$

Каждое из равенств (5.47)–(5.50) справедливо с точностью до бесконечно малой более высокого порядка, чем Δx.

Равенства (5.47)–(5.50) в форме точных оценок уже были установлены нами в конце § 7 гл. 4.

§ 10. Производные и дифференциалы высших порядков

1. Понятие производной n-го порядка. Как уже отмечалось в п. 2 § 1, производная $f'(x)$ функции $y = f(x)$, определенной и дифференцируемой на интервале (a, b), представляет собой *функцию, также определенную на интервале* (a, b). Может случиться, что эта функция $f'(x)$ сама является дифференцируемой в некоторой точке x интервала (a, b), т. е. имеет в этой точке производную. Тогда указанную производную называют *второй производной* (или *производной 2-го порядка*) функции $y = f(x)$ в точке x и обозначают символом $f^{(2)}(x)$ или $y^{(2)}(x)$ [1].

После того как введено понятие второй производной, можно последовательно ввести понятие третьей производной, затем четвертой производной и т. д. Если предположить, что нами уже введено понятие $(n-1)$-й производной и что $(n-1)$-я производная дифференцируема в некоторой точке x интервала (a, b), т. е. имеет в этой точке производную, то указанную производную называют *n-й производной* (или *производной n-го порядка*) функции $y = f(x)$ в точке x и обозначают символом $f^{(n)}(x)$ или $y^{(n)}(x)$.

Таким образом, мы вводим понятие n-й производной индуктивно, переходя от первой производной к последующим. Соотношение, определяющее n-ю производную, имеет вид

$$y^{(n)} = [y^{(n-1)}]'. \tag{5.51}$$

Функцию, имеющую на данном множестве $\{x\}$ конечную производную порядка n, обычно называют n раз дифференцируемой на данном множестве. Понятие производных высших порядков находит многочисленные применения в физике. Здесь мы ограничимся тем, что укажем механический смысл второй производной. Если функция $y = f(x)$ описывает закон движения материальной точки по прямой линии, то, как мы уже знаем, первая производная $f'(x)$ дает мгновенную скорость движущейся точки

---

[1]) Вторую производную функции $y = f(x)$ обозначают также символом $f''(x)$ или $y''(x)$.

в момент времени x. В таком случае вторая производная $f^{(2)}(x)$ равна *скорости изменения скорости*, т. е. равна *ускорению* движущейся точки в момент времени x.

Заметим, что методика вычисления производных высшего порядка предполагает умение вычислять *только производные первого порядка*. В качестве примеров вычислим производные n-го порядка некоторых простейших элементарных функций.

2. n-е производные некоторых функций. 1°. Вычислим n-ю производную степенной функции $y = x^\alpha$ ($x > 0$, α — любое вещественное число). Последовательно дифференцируя, будем иметь

$$y' = \alpha x^{\alpha-1},\ y^{(2)} = \alpha(\alpha-1)x^{\alpha-2},\ y^{(3)} = \alpha(\alpha-1)(\alpha-2)x^{\alpha-3}, \ldots$$

Отсюда легко уяснить общий закон

$$(x^\alpha)^{(n)} = \alpha(\alpha-1)(\alpha-2)\ldots(\alpha-n+1)x^{\alpha-n}.$$

Строгое доказательство этого закона легко проводится методом индукции.

В частном случае $\alpha = m$, где m — натуральное число, получим

$$(x^m)^{(m)} = m!, \quad (x^m)^{(n)} = 0 \text{ при } n > m.$$

Таким образом, n-я производная многочлена m-го порядка при $n > m$ равна нулю [1].

2°. Далее вычислим n-ю производную показательной функции $y = a^x$ ($0 < a \neq 1$). Последовательно дифференцируя, будем иметь

$$y' = a^x \ln a,\ y^{(2)} = a^x \ln^2 a,\ y^{(3)} = a^x \ln^3 a, \ldots$$

Общая формула, легко устанавливаемая по методу индукции, имеет вид

$$(a^x)^{(n)} = a^x \ln^n a.$$

В частности,

$$(e^x)^{(n)} = e^x.$$

3°. Вычислим n-ю производную функции $y = \sin x$. Первую производную этой функции можно записать в виде $y' = \cos x = \sin\left(x + \frac{\pi}{2}\right)$. Таким образом, *дифференцирование функции $y = \sin x$ прибавляет к аргументу этой функции величину $\pi/2$*. Отсюда получаем формулу

$$(\sin x)^{(n)} = \sin\left(x + n\frac{\pi}{2}\right).$$

[1] При этом мы используем еще следующую очевидную формулу $[Au(x) + Bv(x)]^{(n)} = Au^{(n)}(x) + Bv^{(n)}(x)$, где A и B — постоянные.

4°. Совершенно аналогично устанавливается формула

$$(\cos x)^{(n)} = \cos\left(x + n\frac{\pi}{2}\right).$$

5°. В заключение вычислим n-ю производную так называемой *дробно-линейной функции* $y = \dfrac{ax+b}{cx+d}$, где a, b, c и d — некоторые постоянные. Последовательно дифференцируя эту функцию, будем иметь

$$y' = \frac{a(cx+d) - c(ax+b)}{(cx+d)^2} = (ad-bc)(cx+d)^{-2},$$

$$y^{(2)} = (ad-bc)(-2)(cx+d)^{-3}c,$$

$$y^{(3)} = (ad-bc)(-2)(-3)(cx+d)^{-4}c^2, \ldots$$

Легко усмотреть и общий закон

$$y^{(n)} = \left(\frac{ax+b}{cx+d}\right)^{(n)} = (ad-bc)(-1)^{n-1}n!(cx+d)^{-(n+1)}c^{n-1},$$

который может быть обоснован по методу индукции.

3. Формула Лейбница для n-й производной произведения двух функций. В то время как установленное выше правило вычисления первой производной от суммы или разности двух функций $(u \pm v)' = u' \pm v'$ легко переносится (например, по методу индукции) на случай n-й производной $(u \pm v)^{(n)} = u^{(n)} \pm v^{(n)}$, возникают большие затруднения при вычислении n-й производной от произведения двух функций uv.

Соответствующее правило носит название *формулы Лейбница* и имеет следующий вид:

$$(uv)^{(n)} = u^{(n)}v + C_n^1 u^{(n-1)}v' + \\ + C_n^2 u^{(n-2)}v^{(2)} + C_n^3 u^{(n-3)}v^{(3)} + \ldots + uv^{(n)}. \qquad (5.52)$$

Легко подметить закон, по которому построена правая часть формулы Лейбница (5.52): *она совпадает с формулой разложения бинома $(u+v)^n$, лишь вместо степеней u и v стоят производные соответствующих порядков.* Это сходство становится еще более полным, если вместо самих функций u и v писать соответственно $u^{(0)}$ и $v^{(0)}$ (т. е. если рассматривать саму функцию как производную нулевого порядка).

Докажем формулу Лейбница по методу индукции. При $n = 1$ эта формула принимает вид $(uv)' = u'v + uv'$, что совпадает с установленным выше (в § 3) правилом дифференцирования произведения двух функций. Поэтому достаточно, предположив справедливость формулы (5.52) для некоторого номера n, доказать ее справедливость для следующего номера $n+1$. Итак,

пусть для некоторого номера n формула (5.52) верна. Продифференцируем эту формулу и объединим слагаемые, стоящие в правой части, так, как это указано ниже:

$$(uv)^{(n+1)} = u^{(n+1)}v + \left[C_n^0 u^{(n)}v' + C_n^1 u^{(n)}v'\right] + \left[C_n^1 u^{(n-1)}v^{(2)} + \right. \\ \left. + C_n^2 u^{(n-1)}v^{(2)}\right] + \left[C_n^2 u^{(n-2)}v^{(3)} + C_n^3 u^{(n-2)}v^{(3)}\right] + \ldots + uv^{(n+1)}. \tag{5.53}$$

(При этом мы воспользовались тем, что $1 = C_n^0$). Из элементарного курса известно, что для любого номера k, не превосходящего n, справедлива формула [1])

$$C_n^k + C_n^{k-1} = C_{n+1}^k.$$

Пользуясь этой формулой, мы можем следующим образом переписать равенство (5.53):

$$(uv)^{(n+1)} = u^{(n+1)}v + C_{n+1}^1 u^{(n)}v' + C_{n+1}^2 u^{(n-1)}v^{(2)} + \ldots + uv^{(n+1)}.$$

Тем самым доказана справедливость формулы (5.52) для номера $(n+1)$. Вывод формулы Лейбница завершен.

П р и м е р 1. Вычислить n-ю производную функции $y = x^2\cos x$. Воспользуемся формулой Лейбница, положив в ней $u = \cos x$, $v = x^2$. В таком случае для любого номера k $u^{(k)} = \cos\left(x + k\frac{\pi}{2}\right)$, $v' = 2x$, $v^{(2)} = 2$, $v^{(3)} = v^{(4)} = \ldots = 0$. Получим

$$y^{(n)} = x^2\cos\left(x + n\frac{\pi}{2}\right) + 2nx\cos\left[x + (n-1)\frac{\pi}{2}\right] + \\ + n(n-1)\cos\left[x + (n-2)\frac{\pi}{2}\right].$$

П р и м е р 2. Вычислить n-ю производную функции $y = x^3e^x$. Воспользуемся формулой Лейбница, положив в ней $u = e^x$, $v = x^3$. Тогда для любого номера k $u^{(k)} = e^x$, $v' = 3x^2$, $v^{(2)} = 6x$, $v^{(3)} = 6$, $v^{(4)} = v^{(5)} = \ldots = 0$. Получим

$$y^{(n)} = (x^3 + 3nx^2 + 3n(n-1)x + n(n-1)(n-2))e^x.$$

Рассмотренные примеры показывают, что формула Лейбница особенно эффективна в случае, когда одна из двух перемножаемых функций имеет *лишь конечное число отличных от нуля производных*.

4. Дифференциалы высших порядков. В рассуждениях настоящего пункта мы будем использовать для обозначения дифференциала наряду с символом d также и символ δ (т. е. будем писать там, где это удобно, вместо dx и dy символы δx и δy).

[1]) Впрочем, эта формула элементарно проверяется.

Предположим, что функция $y = f(x)$ дифференцируема в некоторой окрестности точки x_0. Тогда первый дифференциал dy этой функции имеет вид [1] $dy = f'(x)dx$ и является функцией двух переменных: точки x и величины dx.

Предположим дополнительно, что функция $f'(x)$ также является дифференцируемой в точке x_0 и что величина dx имеет одно и то же фиксированное значение для всех точек x рассматриваемой окрестности точки x_0.

При этих предположениях существует дифференциал функции $dy = f'(x)dx$ в точке x_0, который мы будем обозначать символом $\delta(dy)$, причем этот последний дифференциал определяется формулой

$$\delta(dy) = \delta[f'(x)dx]\Big|_{x=x_0} = [f'(x)dx]'\Big|_{x=x_0}\delta x = f''(x_0)dx\delta x. \quad (5.54)$$

Определение. *Значение $\delta(dy)$ дифференциала от первого дифференциала dy, взятое при $\delta x = dx$, называют* в т о р ы м д и ф ф е р е н ц и а л о м *функции $y = f(x)$ (в точке x_0) и обозначают символом d^2y.*

Из формулы (5.54) и из определения второго дифференциала вытекает, что

$$d^2y = f''(x_0)(dx)^2. \quad (5.55)$$

Заметим, что так как мы считаем величину dx фиксированной, то из определения второго дифференциала сразу же вытекает, что второй дифференциал независимой переменной d^2x равен нулю.

Совершенно аналогично последовательно определяются дифференциалы более высоких порядков. Предполагая, что производная порядка $(n-1)$ функции $y = f(x)$ дифференцируема в точке x_0 (т. е. предполагая, что функция $y = f(x)$ имеет в точке x_0 производную порядка n), мы определим д и ф ф е р е н ц и а л n-г о п о р я д к а d^ny функции $y = f(x)$ (в точке x_0) как дифференциал $\delta(d^{n-1}y)$ от дифференциала $(n-1)$-го порядка $d^{n-1}y$, взятый при $\delta x = dx$.

Для дифференциала n-го порядка d^ny методом индукции элементарно устанавливается формула

$$d^ny = f^{(n)}(x_0)(dx)^n. \quad (5.56)$$

В самом деле, при $n = 1$ и $n = 2$ формула (5.56) справедлива. Предположим, что эта формула справедлива для некоторого номера $(n-1)$, т. е. предположим, что $d^{n-1}y = f^{(n-1)}(x)(dx)^{n-1}$.

Тогда, согласно определению d^ny, получим [2]

---

[1] См. п. 1 § 9, формулу (5.39).

[2] Мы опускаем индекс 0 у точки x.

$$d^n y = \delta(d^{n-1}y)\big|_{\delta x = dx} = \delta[f^{(n-1)}(x)(dx)^{n-1}]\big|_{\delta x = dx} =$$
$$= f^{(n)}(x)(dx)^{n-1}\delta x\big|_{\delta x = dx} = f^{(n)}(x)(dx)^n,$$

т. е. справедливость формулы (5.56) установлена.

Из формулы (5.56) вытекает следующее выражение для производной порядка n:

$$f^{(n)}(x) = \frac{d^n y}{(dx)^n}. \qquad (5.56')$$

Очень важно отметить, что при $n > 1$ формулы (5.56) и (5.56′) справедливы, вообще говоря, лишь тогда, когда x является *независимой переменной* (т. е. второй и последующие дифференциалы не обладают, вообще говоря, свойством инвариантности формы).

Чтобы убедиться в этом, рассмотрим вопрос о вычислении второго дифференциала (дважды дифференцируемой) функции $y = f(x)$ в предположении, что переменная x является дважды дифференцируемой функцией некоторого аргумента t. Используя равенство (5.39) и формулу $\delta(uv) = v\delta u + u\delta v$, получим

$$d^2 y = \delta(dy)\big|_{\delta x = dx} = \delta[f'(x)dx]\big|_{\delta x = dx} =$$
$$= \{dx\delta[f'(x)] + f'(x)\delta(dx)\}\big|_{\delta x = dx} = [dx\cdot f''(x)\delta x]\big|_{\delta x = dx} + f'(x)d^2x.$$

Итак, $d^2y = f''(x)(dx)^2 + f'(x)d^2x$.

Последняя формула отличается от (5.55) наличием в ней дополнительного и, вообще говоря, не равного нулю члена $f'(x)d^2x$.

§ 11. Дифференцирование функции, заданной параметрически

В этом параграфе мы остановимся на методике вычисления производных функции, заданной параметрически.

Пусть x и y заданы как функции некоторого параметра t: $x = \varphi(t)$, $y = \psi(t)$. При этом мы предположим, что функции $\varphi(t)$ и $\psi(t)$ имеют нужное число производных по переменной t в рассматриваемой области изменения этой переменной. Кроме того, мы предположим, что функция $x = \varphi(t)$ в окрестности рассматриваемой точки имеет обратную функцию $t = \varphi^{-1}(x)$ [1]. Последнее предположение дает нам возможность рассматривать y как функцию аргумента x.

[1]) Это обеспечивается существованием первой производной $\varphi'(t)$, отличной от нуля в некоторой окрестности рассматриваемой точки t (см. п. 4 § 2 гл. 15).

Поставим задачу о вычислении производных y по аргументу x. Эти производные договоримся обозначать символами

$$y'_x,\ y^{(2)}_{x^2},\ y^{(3)}_{x^3}, \ldots$$

В силу свойства инвариантности первого дифференциала можем записать [1])

$$y'_x = \frac{dy}{dx},\ dy = \psi'(t)dt,\ dx = \varphi'(t)dt. \tag{5.57}$$

Из этих формул получим следующее выражение для первой производной:

$$y'_x = \frac{\psi'(t)}{\varphi'(t)}. \tag{5.58}$$

Аналогично вычисляются производные высших порядков. Так, для вычисления второй производной $y^{(2)}_{x^2}$ достаточно представить ее в виде

$$y^{(2)}_{x^2} = \frac{d(y'_x)}{dx}$$

и воспользоваться формулой (5.58), третьей из формул (5.57) и правилом дифференцирования частного.

П р и м е р. Вычислить первую и вторую производные функции, заданной параметрически:

$$x = a(t - \sin t),$$
$$y = a(1 - \cos t),\ -\infty < t < \infty.$$

Кривая, определяемая этими уравнениями, называется *циклоидой* [2]).

Получим

$$y'_x = \frac{a \sin t}{a(1 - \cos t)} = \operatorname{ctg}\frac{t}{2}\ (t \neq 2\pi k,\ \text{где } k \text{ — целое}),$$

$$y^{(2)}_{x^2} = \frac{\left[\operatorname{ctg}\frac{t}{2}\right]'}{a(1 - \cos t)} = \frac{-1}{4a \sin^4 \frac{t}{2}}.$$

---

[1]) При этом мы берем dy и dx в одной и той же точке t и для одного и того же dt.

[2]) Циклоида представляет собой траекторию некоторой фиксированной точки окружности, катящейся без скольжения по прямой линии.

ГЛАВА 6

НЕОПРЕДЕЛЕННЫЙ ИНТЕГРАЛ

В этой главе будет рассмотрена задача о восстановлении функции по известной производной этой функции. Актуальность этой задачи была выяснена в гл. 1.

§ 1. Понятие первообразной функции и неопределенного интеграла

1. Понятие первообразной функции. К числу важных задач механики относится задача об определении закона движения материальной точки по заданной ее скорости, а также задача об определении закона движения и скорости материальной точки по заданному ее ускорению [1]).

Эти задачи приводят к математической проблеме *отыскания функции по заданной производной этой функции.*

Переходим к рассмотрению этой проблемы.

Определение. *Функция $F(x)$ называется первообразной функцией (или просто первообразной) для функции $f(x)$ на интервале (a, b), если в любой точке x интервала (a, b) функция $F(x)$ дифференцируема и имеет производную $F'(x)$, равную $f(x)$.*

Замечание. Аналогично определяется первообразная для функции $f(x)$ *на бесконечной прямой и на открытой полупрямой* [2]).

Примеры. 1) Функция $F(x) = \sqrt{1 - x^2}$ является первообразной для функции $f(x) = -\dfrac{x}{\sqrt{1 - x^2}}$ на интервале $(-1, +1)$,

---

[1]) Вместо ускорения материальной точки можно задать действующую на эту точку силу (ибо, согласно второму закону Ньютона, сила определяет ускорение этой точки).

[2]) И вообще на любом *плотном в себе* множестве $\{x\}$. Определение плотного в себе множества см. в § 3 гл. 2.

ибо в любой точке x этого интервала $\left(\sqrt{1-x^2}\right)' = -\dfrac{x}{\sqrt{1-x^2}}$.

2) Функция $F(x) = \sin x$ является первообразной для функции $f(x) = \cos x$ на бесконечной прямой $(-\infty, \infty)$, ибо в каждой точке x бесконечной прямой $(\sin x)' = \cos x$.

3) Функция $F(x) = \ln x$ является первообразной для функции $f(x) = \dfrac{1}{x}$ на открытой полупрямой $x > 0$, ибо в каждой точке x этой полупрямой $(\ln x)' = \dfrac{1}{x}$.

Если $F(x)$ является первообразной для функции $f(x)$ на интервале (a, b), то, очевидно, и функция $F(x) + C$, где C — любая постоянная, является первообразной для функции $f(x)$ на интервале (a, b).

Естественно, возникает вопрос, как связаны между собой различные первообразные для одной и той же функции $f(x)$. Справедлива следующая *основная* теорема.

Теорема 6.1. *Если $F_1(x)$ и $F_2(x)$ — любые первообразные для функции $f(x)$ на интервале (a, b), то всюду на этом интервале $F_1(x) - F_2(x) = C$, где C — некоторая постоянная.*

Другими словами, две любые первообразные для одной и той же функции могут отличаться лишь на постоянную.

Доказательство. Положим $\Phi(x) = F_1(x) - F_2(x)$. Так как каждая из функций $F_1(x)$ и $F_2(x)$ дифференцируема на интервале (a, b), то в силу теоремы 5.3 и функция $\Phi(x)$ дифференцируема на интервале (a, b), причем всюду на этом интервале $\Phi'(x) = F_1'(x) - F_2'(x) = f(x) - f(x) = 0$.

В § 10 гл. 8 методами, не использующими результатов этой главы [1]), будет доказана теорема 8.13 следующего содержания: если функция $\Phi(x)$ дифференцируема всюду на интервале (a, b) и если всюду на этом интервале $\Phi'(x) = 0$, то функция $\Phi(x)$ является постоянной на интервале (a, b).

Из этой теоремы получим, что $\Phi(x) = F_1(x) - F_2(x) = C = \text{const}$, что и требовалось доказать.

Следствие. *Если $F(x)$ — одна из первообразных функций для функции $f(x)$ на интервале (a, b), то любая первообразная $\Phi(x)$ для функции $f(x)$ на интервале (a, b) имеет вид $\Phi(x) = F(x) + C$, где C — некоторая постоянная.*

2. Неопределенный интеграл.

Определение. *Совокупность всех первообразных функций для данной функции $f(x)$ на интервале (a, b) называется неопределенным интегралом от функции $f(x)$*

[1]) Заметим, что главы 6 и 7 без ущерба для понимания этой книги могут читаться после гл. 8. Мы выдвигаем главы 6 и 7 вперед, чтобы ускорить знакомство читателя с техникой интегрирования.

(*на этом интервале*) *и обозначается символом*

$$\int f(x)\,dx. \tag{6.1}$$

В этом обозначении знак $\int$ называется *знаком интеграла*, выражение $f(x)\,dx$ — *подынтегральным выражением*, а сама функция $f(x)$ — *подынтегральной функцией*.

Если $F(x)$ — одна из первообразных функций для функции $f(x)$ на интервале (a, b), то, в силу следствия из теоремы 6.1,

$$\int f(x)\,dx = F(x) + C, \tag{6.2}$$

где C — любая постоянная.

Подчеркнем, что *если первообразная* (*а стало быть, и неопределенный интеграл*) *для функции* $f(x)$ *на интервале* (a, b) *существует, то подынтегральное выражение в формуле* (6.1) *представляет собой дифференциал любой из этих первообразных*. В самом деле, пусть $F(x)$ — любая из первообразных для функции $f(x)$ на интервале (a, b), т.е. для всех x из интервала (a, b) $F'(x) = f(x)$. Тогда $f(x)\,dx = F'(x)\,dx = dF$.

П р и м е р ы. 1) $\int \frac{-x}{\sqrt{1-x^2}}\,dx = \sqrt{1-x^2} + C$ на интервале $-1 < x < 1$, ибо функция $F(x) = \sqrt{1-x^2}$ является одной из первообразных для функции $f(x) = \frac{-x}{\sqrt{1-x^2}}$ на указанном интервале.

2) $\int \cos x\; dx = \sin x + C$ на всей бесконечной прямой $-\infty < x < \infty$, ибо функция $F(x) = \sin x$ является одной из первообразных для функции $f(x) = \cos x$ на бесконечной прямой.

В этой главе мы не будем заниматься вопросом о *существовании* первообразных (или неопределенных интегралов) для широких классов функций. Здесь мы лишь отметим, что в § 7 гл. 10 будет доказано, что *для всякой функции* $f(x)$, *непрерывной на интервале* (a, b), *существует на этом интервале первообразная функция* (*и неопределенный интеграл*).

Операцию нахождения первообразной или неопределенного интеграла (от функции $f(x)$) принято называть и н т е г р и р о в а н и е м (функции $f(x)$).

3. Основные свойства неопределенного интеграла. Прежде всего отметим два свойства, непосредственно вытекающие из определения неопределенного интеграла:

1°. $d\int f(x)\,dx = f(x)\,dx$.

2°. $\int dF(x) = F(x) + C$.

Свойство 1° означает, что знаки d и $\int$ взаимно сокращаются в случае, если знак дифференциала стоит перед знаком интеграла.

Свойство 2° означает, что знаки $\int$ и d взаимно сокращаются и в случае, если знак интеграла стоит перед знаком дифференциала, но в этом случае к $F(x)$ следует добавить произвольную постоянную C.

Для установления свойства 1° достаточно взять дифференциал от обеих частей формулы (6.2) и учесть, что $dF(x) = F'(x)\,dx = f(x)\,dx$.

Для установления свойства 2° достаточно в левой части (6.2) воспользоваться равенством $dF(x) = f(x)\,dx$.

Следующие два свойства обычно называют *линейными свойствами* интеграла:

3°. $\int [f(x) \pm g(x)]\,dx = \int f(x)\,dx \pm \int g(x)\,dx$.

4°. $\int [Af(x)]\,dx = A\int f(x)\,dx$ $(A = \text{const})$.

Подчеркнем, что равенство в формулах 3° и 4° имеет условный характер: его следует понимать как равенство правой и левой частей с точностью до произвольного постоянного слагаемого (это понятно, поскольку каждый из интегралов, фигурирующих в формулах 3° и 4°, определен с точностью до произвольного постоянного слагаемого).

Поскольку две первообразные для одной и той же функции могут отличаться лишь на постоянную, то для доказательства свойства 3° достаточно доказать, что если $F(x)$ — первообразная для $f(x)$, а $G(x)$ — первообразная для $g(x)$, то функция $[F(x) \pm G(x)]$ является первообразной для функции $f(x) \pm g(x)$. Это последнее непосредственно вытекает из того, что производная (алгебраической) суммы функций равна сумме производных этих функций, т. е. $[F(x) \pm G(x)]' = F'(x) \pm G'(x) = f(x) \pm g(x)$. Аналогично доказывается свойство 4°. В этом случае используется равенство $[AF(x)]' = AF'(x) = Af(x)$.

4. Таблица основных неопределенных интегралов. В гл. 5 мы получили таблицу производных простейших элементарных функций (см. § 8 гл. 5), представляющую собой вычислительный аппарат дифференциального исчисления. Каждая формула этой таблицы, устанавливающая, что та или иная функция $F(x)$ имеет производную, равную $f(x)$, приводит нас, в силу определения неопределенного интеграла, к соответствующей формуле интегрального исчисления

$$\int f(x)\,dx = F(x) + C.$$

Таким путем мы приходим к следующей таблице основных неопределенных интегралов:

1°. $\int 0 \cdot dx = C$.

2°. $\int 1 \cdot dx = x + C$.

3°. $\displaystyle\int x^\alpha\, dx = \frac{x^{\alpha+1}}{\alpha+1} + C \ (\alpha \neq -1)$.

4°. $\displaystyle\int \frac{dx}{x} = \ln|x| + C \ (x \neq 0)$.

5°. $\displaystyle\int a^x\, dx = \frac{a^x}{\ln a} + C \ (0 < a \neq 1)$, $\int e^x\, dx = e^x + C$.

6°. $\int \sin x\, dx = -\cos x + C$.

7°. $\int \cos x\, dx = \sin x + C$.

8°. $\displaystyle\int \frac{dx}{\cos^2 x} = \int (1 + \operatorname{tg}^2 x)\, dx = \operatorname{tg} x + C$ $\left(x \neq \frac{\pi}{2} + \pi n\right.$, где $\left.n = 0, \pm 1, \ldots\right)$.

9°. $\displaystyle\int \frac{dx}{\sin^2 x} = \int (1 + \operatorname{ctg}^2 x)\, dx = -\operatorname{ctg} x + C$ ($x \neq \pi n$, где $n = 0, \pm 1, \ldots$).

10°. $\displaystyle\int \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = \begin{cases} \arcsin x + C, \\ -\arccos x + C \end{cases} \quad (-1 < x < 1)$.

11°. $\displaystyle\int \frac{dx}{1+x^2} = \begin{cases} \operatorname{arctg} x + C, \\ -\operatorname{arcctg} x + C. \end{cases}$

12°. $\displaystyle\int \frac{dx}{\sqrt{x^2 \pm 1}} = \ln\left|x + \sqrt{x^2 \pm 1}\right| + C$ (при $-$ $|x| > 1$).

13°. $\displaystyle\int \frac{dx}{1-x^2} = \frac{1}{2}\ln\left|\frac{1+x}{1-x}\right| + C \ (|x| \neq 1)$.

К этим формулам можно присоединить и соответствующие формулы для гиперболических функций:

14°. $\int \operatorname{sh} x\, dx = \operatorname{ch} x + C$.

15°. $\int \operatorname{ch} x\, dx = \operatorname{sh} x + C$.

16°. $\displaystyle\int \frac{dx}{\operatorname{ch}^2 x} = \operatorname{th} x + C$.

17°. $\displaystyle\int \frac{dx}{\operatorname{sh}^2 x} = -\operatorname{cth} x + C \ (x \neq 0)$.

Сделаем замечания в отношении формул 4, 12 и 13. Формула 4 справедлива для любого интервала, не содержащего значения $x = 0$. В самом деле, если $x > 0$, то из формулы $(\ln x)' = \dfrac{1}{x}$ заключаем, что $\displaystyle\int \frac{dx}{x} = \ln x + C$, а если $x < 0$, то из формулы

$[\ln(-x)]' = \dfrac{1}{x}$ заключаем, что $\displaystyle\int \frac{dx}{x} = \ln(-x) + C$. Тем самым формула 4 оправдана для любого $x \neq 0$.

Формулы 12 и 13 занимают исключительное положение в нашей таблице, ибо эти формулы не имеют аналогов среди формул таблицы производных.

Однако для проверки формул 12 и 13 достаточно убедиться в том, что производные выражений, стоящих в правых частях этих формул, совпадают с соответствующими подынтегральными функциями.

Наша ближайшая цель — дополнить таблицу неопределенных интегралов основными приемами и методами интегрирования. Но прежде чем приступить к реализации этой цели, сделаем одно важное замечание.

В § 7 гл. 4 мы ввели понятие *элементарной функции*, а в п. 3 § 8 гл. 5 установили, что производная любой элементарной функции представляет собой также элементарную функцию. Иными словами, мы установили, что *операция дифференцирования не выводит нас из класса элементарных функций.*

Отметим сразу же, что с операцией интегрирования дело обстоит иначе. Можно доказать, что интегралы от некоторых элементарных функций уже не являются элементарными функциями. Примерами таких интегралов могут служить следующие:

1°. $\int e^{-x^2}\,dx$.

2°. $\int \cos(x^2)\,dx$.

3°. $\int \sin(x^2)\,dx$.

4°. $\displaystyle\int \frac{dx}{\ln x}$ $(0 < x \neq 1)$.

5°. $\displaystyle\int \frac{\cos x}{x}\,dx$ $(x \neq 0)$.

6°. $\displaystyle\int \frac{\sin x}{x}\,dx$.

Каждый из указанных интегралов *представляет собой функцию, не являющуюся элементарной.* Указанные функции не только реально существуют [1]), но и играют большую роль в различных вопросах физики. Так, например, интеграл 1, называемый *интегралом Пуассона* или *интегралом ошибок*, широко используется в статистической физике, в теории теплопроводности и диффузии, интегралы 2 и 3, называемые *интегралами*

[1]) Мы уже отмечали, что в § 7 гл. 10 будет доказано существование неопределенного интеграла от любой непрерывной функции. Существование интегралов 1–6 обеспечивается непрерывностью подынтегральных функций.

Френеля, широко применяются в оптике. Часто встречаются в приложениях и интегралы 4–6, первый из которых называется *интегральным логарифмом*, а последние два — *интегральными косинусом и синусом.*

Для всех перечисленных новых функций (интеграла Пуассона, интегралов Френеля, интегрального логарифма, синуса и косинуса) составлены таблицы и графики.

Ввиду важности для приложений, эти функции изучены с такой же полнотой, как и простейшие элементарные функции. Вообще следует подчеркнуть условность понятия простейшей элементарной функции.

§ 2. Основные методы интегрирования

1. Интегрирование заменой переменной (подстановкой). Замена переменной — один из самых эффективных приемов интегрирования. Этот прием базируется на следующем элементарном утверждении.

Пусть функция $t = \varphi(x)$ определена и дифференцируема на некотором множестве $\{x\}$ [1] *и пусть $\{t\}$ — множество всех значений этой функции. Пусть далее для функции $g(t)$ существует на множестве $\{t\}$ первообразная функция $G(t)$, т. е.*

$$\int g(t)\,dt = G(t) + C. \tag{6.3}$$

Тогда всюду на множестве $\{x\}$ для функции $g[\varphi(x)]\varphi'(x)$ существует первообразная функция, равная $G[\varphi(x)]$, т. е.

$$\int g[\varphi(x)]\varphi'(x)\,dx = G[\varphi(x)] + C. \tag{6.4}$$

Для доказательства этого утверждения достаточно воспользоваться правилом дифференцирования сложной функции [2]

$$\frac{d}{dx}\{G[\varphi(x)]\} = G'[\varphi(x)]\varphi'(x)$$

и учесть, что, по определению первообразной, $G'(t) = g(t)$. Предположим теперь, что нам требуется вычислить интеграл

$$\int f(x)\,dx. \tag{6.5}$$

В ряде случаев удается выбрать в качестве новой переменной такую дифференцируемую функцию $t = \varphi(x)$, что имеет место

[1] Это множество представляет собой либо интервал, либо сегмент, либо полупрямую, либо бесконечную прямую.

[2] См. § 7 гл. 5.

равенство

$$f(x) = g[\varphi(x)]\varphi'(x), \tag{6.6}$$

причем функция $g(t)$ легко интегрируется, т. е. интеграл

$$\int g(t)\,dt = G(t) + C$$

просто вычисляется. Доказанное выше утверждение позволяет нам написать следующую формулу для интеграла (6.5):

$$\int f(x)\,dx = G[\varphi(x)] + C. \tag{6.7}$$

Этот прием вычисления интеграла (6.5) и называется *интегрированием путем замены переменной.*

Конечно, такой прием применим не ко всякому интегралу. Кроме того, следует подчеркнуть, что выбор правильной подстановки в значительной мере определяется искусством вычислителя. Приведем ряд примеров, иллюстрирующих только что изложенный метод.

1°. Вычислить $\int \cos 2x\ dx$. Для вычисления этого интеграла следует сделать простейшую подстановку $t = 2x$, $dt = 2\,dx$. В результате этой замены получим

$$\int \cos 2x\ dx = \int \frac{1}{2}\cos t\,dt = \frac{1}{2}\sin t + C = \frac{1}{2}\sin 2x + C.$$

2°. Вычислить $\int \frac{dx}{x+a}$. Этот интеграл вычисляется посредством замены $t = x + a$, $dt = dx$.

При этом получим

$$\int \frac{dx}{x+a} = \int \frac{dt}{t} = \ln|t| + C = \ln|x+a| + C \quad (x \neq -a).$$

3°. Вычислить $\int e^{\cos x}\sin x\ dx$. Легко видеть, что этот интеграл вычисляется путем замены $t = \cos x$.

В самом деле, при этом $dt = -\sin x\ dx$ и

$$\int e^{\cos x}\sin x\ dx = -\int e^t\,dt = -e^t + C = -e^{\cos x} + C.$$

4°. Вычислить $\int \frac{(\operatorname{arctg} x)^{100}}{1+x^2}\,dx$. Для вычисления этого интеграла удобна замена $t = \operatorname{arctg} x$. В самом деле, при такой замене $dt = \frac{dx}{1+x^2}$ и $\int \frac{(\operatorname{arctg} x)^{100}}{1+x^2}\,dx = \int t^{100}\,dt = \frac{t^{101}}{101} + C = \frac{(\operatorname{arctg} x)^{101}}{101} + C.$

5°. Вычислить $\int (7x-9)^{2999}\,dx$. Конечно, этот интеграл можно свести к сумме трех тысяч табличных интегралов, расписывая подынтегральную функцию по формуле бинома Ньютона. Несравненно проще сделать замену $t = 7x - 9$, $dt = 7\,dx$, в результате которой мы получим

$$\int (7x-9)^{2999}\,dx = \frac{1}{7}\int t^{2999}dt = \frac{t^{3000}}{21\,000} + C = \frac{(7x-9)^{3000}}{21\,000} + C.$$

6°. Вычислить $\displaystyle\int \frac{dx}{\cos x}$. Чтобы усмотреть ту замену, посредством которой может быть взят этот интеграл, перепишем его в виде

$$\int \frac{dx}{\cos x} = \int \frac{\cos x\ dx}{\cos^2 x} = \int \frac{\cos x\ dx}{1-\sin^2 x}.$$

После этого понятно, что следует положить $t = \sin x$, $dt = \cos x\ dx$. В результате получим

$$\int \frac{dx}{\cos x} = \int \frac{dt}{1-t^2} = \frac{1}{2}\ln\left|\frac{1+t}{1-t}\right| + C = \ln\left|\operatorname{tg}\left(\frac{x}{2}+\frac{\pi}{4}\right)\right| + C.$$

7°. Вычислить $\displaystyle\int \frac{x^3\,dx}{(2x)^8+1}$. Удобна замена $t = (2x)^4$, $dt = 64x^3\,dx$. При этом

$$\int \frac{x^3\,dx}{(2x)^8+1} = \frac{1}{64}\int \frac{dt}{t^2+1} = \frac{\operatorname{arctg} t}{64} + C = \frac{\operatorname{arctg}(2x)^4}{64} + C.$$

8°. Вычислить $\displaystyle\int \frac{dx}{(x^2+a^2)^{3/2}}$. Для вычисления этого интеграла оказывается удобной тригонометрическая подстановка $t = \operatorname{arctg}\dfrac{x}{a}$, $x = a\operatorname{tg} t$, $dx = a\dfrac{dt}{\cos^2 t}$.

В результате этой подстановки интеграл принимает вид

$$\int \frac{dx}{(x^2+a^2)^{3/2}} = \frac{1}{a^2}\int \cos t\,dt = \frac{\sin t}{a^2} + C = \frac{\operatorname{tg} t}{a^2\sqrt{1+\operatorname{tg}^2 t}} + C = \\ = \frac{x}{a^2\sqrt{x^2+a^2}} + C.$$

9°. Вычислить $\displaystyle\int \frac{dx}{(a^2-x^2)^{3/2}}$. Здесь оказывается удобной подстановка $t = \arcsin\dfrac{x}{a}$, $x = a\sin t$, $dx = a\cos t\,dt$. При этом

$$\int \frac{dx}{(a^2-x^2)^{3/2}} = \frac{1}{a^2}\int \frac{dt}{\cos^2 t} = \frac{\operatorname{tg} t}{a^2} + C = \\ = \frac{1}{a^2}\frac{\sin t}{\sqrt{1-\sin^2 t}} + C = \frac{x}{a^2\sqrt{a^2-x^2}} + C.$$

10°. Вычислить $\int \sqrt{\frac{a+x}{a-x}}\,dx$. Для вычисления этого интеграла оказывается удобной замена $2t = \arccos\frac{x}{a}$, $x = a\cos 2t$, $dx = -2a\sin 2t\,dt$. Мы получим

$$\int \sqrt{\frac{a+x}{a-x}}\,dx = -4a\int \cos^2 t\,dt =$$

$$= -4a\int\left(\frac{1}{2}+\frac{1}{2}\cos 2t\right)dt = -2at - 2a\int\cos 2t\,dt =$$

$$= -2at - a\sin 2t + C = -a\left[\arccos\frac{x}{a} + \sqrt{1-\left(\frac{x}{a}\right)^2}\right] + C.$$

2. Интегрирование по частям. К числу весьма эффективных методов интегрирования относится *метод интегрирования по частям.* Этот метод основывается на следующем утверждении.

Пусть каждая из функций $u(x)$ *и* $v(x)$ *дифференцируема на множестве* $\{x\}$ *и, кроме того, на этом множестве существует первообразная для функции* $v(x)u'(x)$. *Тогда на множестве* $\{x\}$ *существует первообразная и для функции* $u(x)v'(x)$, *причем справедлива формула*

$$\int u(x)v'(x)\,dx = u(x)v(x) - \int v(x)u'(x)\,dx. \tag{6.8}$$

З а м е ч а н и е. Определение дифференциала и свойство инвариантности его формы позволяет записать формулу (6.8) в виде

$$\int u\,dv = u(x)v(x) - \int v\,du. \tag{6.9}$$

Для доказательства сформулированного утверждения запишем формулу для производной произведения двух функций $u(x)$ и $v(x)$

$$[u(x)v(x)]' = u(x)v'(x) + u'(x)v(x). \tag{6.10}$$

Умножим равенство (6.10) на dx и возьмем интеграл от обеих частей полученного таким путем равенства. Так как по условию для всех x из множества $\{x\}$ существует $\int v(x)u'(x)\,dx$ и $\int [u(x)v(x)]'\,dx = u(x)v(x)+C$ (см. свойство 2° из п. 3 § 1), то для всех x из множества $\{x\}$ существует и интеграл $\int u(x)v'(x)\,dx$, причем справедлива формула (6.8) (или (6.9)).

Формула (6.9) *сводит вопрос о вычислении интеграла* $\int u\,dv$ *к вычислению интеграла* $\int v\,du$. В ряде конкретных случаев этот последний интеграл без труда вычисляется.

Вычисление интеграла $\int u\,dv$ посредством применения формулы (6.9) и называют *интегрированием по частям.* Заметим, что при конкретном применении формулы интегрирования по частям (6.9) очень удобно пользоваться таблицей дифференциалов, выписанной нами в п. 2 § 9 гл. 5.

Переходим к рассмотрению примеров.

1°. Вычислим интеграл $I = \int x^n \ln x\,dx$ $(n \neq -1)$. Полагая $u = \ln x$, $dv = x^n\,dx$ и используя формулу (6.9), получим $du = \dfrac{dx}{x}$, $v = \dfrac{x^{n+1}}{n+1}$,

$$I = \frac{x^{n+1}}{n+1}\ln x - \frac{1}{(n+1)}\int x^n\,dx = \frac{x^{n+1}}{n+1}\left(\ln x - \frac{1}{n+1}\right) + C.$$

2°. Вычислим далее интеграл $I = \int x \operatorname{arctg} x\,dx$. Полагая $u = \operatorname{arctg} x$, $dv = x\,dx$ и используя формулу (6.9), будем иметь $du = \dfrac{dx}{1+x^2}$, $v = \dfrac{x^2}{2}$,

$$I = \frac{x^2}{2}\operatorname{arctg} x - \frac{1}{2}\int \frac{x^2}{1+x^2}\,dx = \frac{x^2}{2}\operatorname{arctg} x - \frac{1}{2}\int \frac{[(1+x^2)-1]}{1+x^2}\,dx =$$
$$= \frac{x^2}{2}\operatorname{arctg} x - \frac{1}{2}\int dx + \frac{1}{2}\int \frac{dx}{1+x^2} = \frac{x^2+1}{2}\operatorname{arctg} x - \frac{x}{2} + C.$$

3°. Вычислим интеграл $I = \int x^2 \cos x\,dx$. Сначала применим формулу (6.9), полагая $u = x^2$, $dv = \cos x\,dx$. Получим $du = 2x\,dx$, $v = \sin x$, $I = x^2 \sin x - 2\int x \sin x\,dx$. Для вычисления последнего интеграла еще раз применим формулу (6.9), полагая на этот раз $u = x$, $dv = \sin x\,dx$. Получим $du = dx$, $v = -\cos x$, $I = x^2 \sin x + 2x \cos x - 2\int \cos x\,dx = (x^2-2)\sin x + 2x\cos x + C$. Таким образом, интеграл $\int x^2 \cos x\,dx$ вычислен нами посредством двукратного интегрирования по частям. Легко понять, что интеграл $\int x^n \cos x\,dx$ (где n — любое целое положительное число) может быть вычислен по аналогичной схеме посредством n-кратного интегрирования по частям.

4°. Вычислим теперь интеграл $I = \int e^{ax}\cos bx\,dx$ $(a = \mathrm{const}$, $b = \mathrm{const})$. Сначала применим формулу (6.9), полагая $u = e^{ax}$, $dv = \cos bx\,dx$. Получим $du = ae^{ax}\,dx$, $v = \dfrac{\sin bx}{b}$,

$$I = \frac{e^{ax}\sin bx}{b} - \frac{a}{b}\int e^{ax}\sin bx\,dx.$$

Для вычисления последнего интеграла еще раз применим формулу (6.9), полагая на этот раз $u = e^{ax}$, $dv = \sin bx\,dx$. Получим

$du = ae^{ax}\,dx$, $v = -\dfrac{\cos bx}{b}$,

$$I = \frac{e^{ax}\sin bx}{b} + \frac{a}{b^2}e^{ax}\cos bx - \frac{a^2}{b^2}I. \qquad (6.11)$$

Таким образом, посредством двукратного интегрирования по частям мы получили для интеграла уравнение первого порядка (6.11). Из этого уравнения находим

$$I = \frac{a\cos bx + b\sin bx}{a^2+b^2}e^{ax}.$$

Практика показывает, что большая часть интегралов, берущихся посредством интегрирования по частям, может быть разбита на следующие *три группы*:

1) К *первой* группе относятся интегралы, подынтегральная функция которых содержит в качестве множителя одну из следующих функций: $\ln x$, $\arcsin x$, $\arccos x$, $\operatorname{arctg} x$, $(\operatorname{arctg} x)^2$, $(\arccos x)^2$, $\ln\varphi(x)$, ... (см. рассмотренные выше примеры 1° и 2°). Для вычисления интегралов первой группы следует применить формулу (6.9), полагая в ней $u(x)$ равной одной из указанных выше функций [1]).

2) Ко *второй* группе относятся интегралы вида

$$\int (ax+b)^n\cos(cx)dx,\quad \int (ax+b)^n\sin(cx)dx,\quad \int (ax+b)^n e^{cx}\,dx,$$

где a, b, c — некоторые постоянные, n — любое целое положительное число (см. выше, пример 3°). Интегралы *второй* группы берутся путем n-кратного применения формулы интегрирования по частям (6.9), причем в качестве $u(x)$ всякий раз следует брать $(ax+b)$ в соответствующей степени. После каждого интегрирования по частям эта степень будет понижаться на единицу.

3) К *третьей* группе относятся интегралы вида $\int e^{ax}\cos bx\,dx$, $\int e^{ax}\sin bx\,dx$, $\int \sin(\ln x)\,dx$, $\int \cos(\ln x)\,dx$, ... (см. рассмотренный выше пример 4°). Обозначая любой из интегралов этой группы через I и производя двукратное интегрирование по частям, мы составим для I уравнение первого порядка.

Конечно, указанные три группы не исчерпывают всех без исключения интегралов, берущихся посредством интегрирования по частям. Приведем примеры интегралов, не входящих ни в одну из перечисленных трех групп, но вычислимых при помощи формулы (6.9).

---

[1]) В случае, если подынтегральная функция содержит в качестве множителя $(\operatorname{arctg} x)^2$, $(\arccos x)^2$, ... , формулу интегрирования по частям (6.9) придется применить дважды.

5°. Вычислим интеграл $I = \int \frac{x\,dx}{\cos^2 x}$. Этот интеграл не входит ни в одну из упомянутых трех групп. Тем не менее, применяя формулу (6.9) и полагая в ней $u = x$, $dv = \frac{dx}{\cos^2 x}$, получим $du = dx$, $v = \operatorname{tg} x$,

$$I = x \operatorname{tg} x - \int \operatorname{tg} x\, dx = x \operatorname{tg} x - \int \frac{\sin x\, dx}{\cos x} =$$
$$= x \operatorname{tg} x + \int \frac{d(\cos x)}{\cos x} = x \operatorname{tg} x + \ln|\cos x| + C.$$

6°. Вычислим, наконец, весьма важный для дальнейшего интеграл $K_\lambda = \int \frac{dt}{(t^2+a^2)^\lambda}$, где $a = \text{const}$, $\lambda = 1, 2, \ldots$ Этот интеграл также не входит ни в одну из упомянутых выше трех групп. Для вычисления этого интеграла установим для него рекуррентную формулу, сводящую вопрос о вычислении K_λ к вычислению $K_{\lambda-1}$.

Можно записать (при $\lambda \neq 1$)

$$K_\lambda = \frac{1}{a^2} \int \frac{a^2 dt}{(t^2+a^2)^\lambda} = \frac{1}{a^2} \int \frac{[(t^2+a^2)-t^2]\,dt}{(t^2+a^2)^\lambda} =$$
$$= \frac{1}{a^2} \int \frac{dt}{(t^2+a^2)^{\lambda-1}} - \frac{1}{2a^2} \int t \frac{2t\,dt}{(t^2+a^2)^\lambda} = \frac{1}{a^2} K_{\lambda-1} - \frac{1}{2a^2} \int t \frac{d(t^2+a^2)}{(t^2+a^2)^\lambda}.$$

Для вычисления последнего интеграла применим формулу интегрирования по частям (6.9), полагая в ней $u = t$, $dv = \frac{d(t^2+a^2)}{(t^2+a^2)^\lambda}$. Получим $du = dt$, $v = \frac{-1}{(\lambda-1)(t^2+a^2)^{\lambda-1}}$,

$$K_\lambda = \frac{1}{a^2} K_{\lambda-1} + \frac{t}{2a^2(\lambda-1)(t^2+a^2)^{\lambda-1}} - \frac{1}{2a^2(\lambda-1)} K_{\lambda-1}.$$

Из последнего равенства получим рекуррентную формулу

$$K_\lambda = \frac{t}{2a^2(\lambda-1)(t^2+a^2)^{\lambda-1}} + \frac{1}{a^2} \frac{(2\lambda-3)}{(2\lambda-2)} K_{\lambda-1}. \tag{6.12}$$

Убедимся в том, что рекуррентная формула (6.12) позволяет вычислить интеграл K_λ для любого $\lambda = 2, 3, \ldots$ В самом деле, интеграл K_1 вычисляется элементарно

$$K_1 = \int \frac{dt}{t^2+a^2} = \frac{1}{a} \int \frac{d(t/a)}{(t/a)^2+1} = \frac{1}{a} \operatorname{arctg} \frac{t}{a} + C.$$

После того как вычислен интеграл K_1, полагая в формуле (6.12) $\lambda = 2$, мы без труда вычислим K_2. В свою очередь, зная K_2 и полагая в формуле (6.12) $\lambda = 3$, мы без труда вычислим K_3. Продолжая действовать таким образом дальше, мы вычислим интеграл K_λ для любого натурального λ.

ГЛАВА 7

КОМПЛЕКСНЫЕ ЧИСЛА. АЛГЕБРА МНОГОЧЛЕНОВ. ИНТЕГРИРОВАНИЕ В ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ФУНКЦИЯХ

В предыдущей главе было указано, что неопределенный интеграл от элементарной функции, вообще говоря, не является элементарной функцией. Тем не менее существуют довольно широкие классы функций, интегралы от которых представляют собой элементарные функции. (Такие классы функций мы будем называть *интегрируемыми в элементарных функциях.*) Изучение указанных классов функций и составляет основную цель настоящей главы. Поскольку среди указанных классов функций одним из основных является *класс рациональных функций*, мы должны прежде всего уточнить наши представления о многочленах и рациональных функциях. Для этого в свою очередь требуется уточнить наши сведения о комплексных числах.

§ 1. Краткие сведения о комплексных числах

Два вещественных числа x и y мы будем называть упорядоченной парой, если указано, какое из этих чисел является первым, какое вторым. Упорядоченную пару вещественных чисел x и y будем обозначать символом (x, y), записывая на первом месте первый элемент пары x.

Комплексным числом называется упорядоченная пара (x, y) вещественных чисел, первое из которых x называется действительной частью, а второе y — мнимой частью этого комплексного числа.

В случае, когда мнимая часть y равна нулю, соответствующую пару $(x, 0)$ договариваются отождествлять с вещественным числом x. Это позволяет рассматривать множество всех вещественных чисел как часть множества комплексных чисел.

Два комплексных числа $z_1 = (x_1, y_1)$ и $z_2 = (x_2, y_2)$ называ-

ются равными, если $x_1 = x_2$, $y_1 = y_2$. Говорят, что *комплексное число* $z = (x, y)$ *равно нулю, если* $x = 0$ *и* $y = 0$.

Определим операции сложения и умножения комплексных чисел. Поскольку вещественные числа являются частью множества комплексных чисел, эти операции должны быть определены так, чтобы в применении к двум вещественным числам они приводили к уже известным нам из § 2 гл. 2 определениям суммы и произведения вещественных чисел.

Суммой двух комплексных чисел $z_1 = (x_1, y_1)$ *и* $z_2 = (x_2, y_2)$ *назовем комплексное число* z *вида*

$$z = (x_1 + x_2,\ y_1 + y_2). \tag{7.1}$$

Произведением двух комплексных чисел $z_1 = (x_1, y_1)$ *и* $z_2 = (x_2, y_2)$ *назовем комплексное число* z *вида*

$$z = (x_1x_2 - y_1y_2,\ x_1y_2 + x_2y_1). \tag{7.2}$$

Легко проверить, что сумма и произведение комплексных чисел обладают теми же самыми свойствами, что и сумма и произведение вещественных чисел. Именно справедливы следующие свойства:

1°. $z_1 + z_2 = z_2 + z_1$ (переместительное свойство суммы).

2°. $(z_1 + z_2) + z_3 = z_1 + (z_2 + z_3)$ (сочетательное свойство суммы).

3°. $z + (0, 0) = z$ (особая роль числа $(0, 0)$).

4°. Для каждого числа $z = (x, y)$ существует противоположное ему число $z' = (-x, -y)$ такое, что $z + z' = (0, 0)$.

5°. $z_1 \cdot z_2 = z_2 \cdot z_1$ (переместительное свойство произведения).

6°. $(z_1 \cdot z_2) \cdot z_3 = z_1 \cdot (z_2 \cdot z_3)$ (сочетательное свойство произведения).

7°. $z \cdot (1, 0) = z$ (особая роль числа $(1, 0)$).

8°. Для любого комплексного числа $z = (x, y)$, не равного нулю, существует обратное ему число $\frac{1}{z} = \left(\frac{x}{x^2+y^2}, -\frac{y}{x^2+y^2}\right)$ такое, что $z \cdot \frac{1}{z} = (1, 0)$.

9°. $(z_1 + z_2) \cdot z_3 = z_1 \cdot z_3 + z_2 \cdot z_3$ (распределительное свойство произведения относительно суммы).

Свойства 1°–9° позволяют утверждать, что для комплексных чисел полностью сохраняются все правила элементарной алгебры, относящиеся к арифметическим действиям и к сочетанию равенств.

Кроме того, эти свойства полностью решают вопрос о *вычитании комплексных чисел* как о действии, обратном сложению, и о *делении комплексных чисел* как о действии, обратном умножению.

Разностью двух комплексных чисел $z_1 = (x_1, y_1)$ *и* $z_2 = (x_2, y_2)$ *называется такое комплексное число* z, *которое в*

сумме с z_2 дает z_1. С помощью свойств 1°–4° элементарно устанавливается существование и единственность разности двух любых комплексных чисел [1]).

Легко проверить, что разностью двух комплексных чисел $z_1 = (x_1, y_1)$ и $z_2 = (x_2, y_2)$ является комплексное число z вида

$$z = (x_1 - x_2,\ y_1 - y_2). \tag{7.3}$$

Частным двух комплексных чисел $z_1 = (x_1, y_1)$ и $z_2 = (x_2, y_2)$, второе из которых не равно нулю, называется такое комплексное число z, которое при умножении на z_2 дает z_1. С помощью свойств 5°–8° легко установить, что единственным частным двух указанных комплексных чисел является комплексное число z вида

$$z = \left(\frac{x_1x_2 + y_1y_2}{x_2^2 + y_2^2}, \frac{x_2y_1 - x_1y_2}{x_2^2 + y_2^2}\right). \tag{7.4}$$

В операциях с комплексными числами особую роль играет число, представимое парой $(0, 1)$ и обозначаемое буквой i. Умножая эту пару само на себя (т. е. возводя ее в квадрат), получим в силу определения произведения комплексных чисел:

$$(0, 1) \cdot (0, 1) = (-1, 0) = -1, \text{ т. е. } i^2 = -1.$$

Заметив это, мы можем любое комплексное число $z = (x, y)$ представить в виде

$$z = (x, y) = (x, 0) + (0, y) = (x, 0) + (y, 0) \cdot (0, 1) = x + iy.$$

В дальнейшем мы будем широко использовать для комплексного числа $z = (x, y)$ представление $z = x + iy$. Это представление и рассмотрение i в качестве множителя, квадрат которого равен -1, позволяет производить операции с комплексными числами так же, как они производятся с алгебраическими многочленами.

Комплексное число $\overline{z} = (x, -y) = x - iy$ принято называть *сопряженным по отношению к комплексному числу $z = (x, y) = x + iy$.*

Очевидно, что *комплексное число равно нулю тогда и только тогда, когда равно нулю сопряженное ему число*, ибо равенства $x = 0$, $y = 0$ эквивалентны равенствам $x = 0$, $-y = 0$.

Для геометрического изображения комплексных чисел удобно пользоваться декартовой прямоугольной системой координат. При этом комплексное число $z = (x, y)$ изображается или точкой M с координатами (x, y), или вектором $\overrightarrow{OM}$, идущим из начала координат в точку M.

---

[1]) Это делается точно так же, как и для вещественных чисел (см. п. 3 § 2 гл. 2).

При таком способе изображения сложение и вычитание комплексных чисел сводится к сложению и вычитанию соответствующих им векторов (это понятно из формул (7.1) и (7.3)).

Если наряду с декартовой системой координат ввести полярную систему координат так, чтобы полюс находился в начале O декартовой системы, а полярная ось была направлена вдоль положительного направления оси Ox, то декартовы координаты (x, y) и полярные координаты (ρ, θ) любой точки M, как известно, связаны формулами

$$\begin{aligned} x &= \rho\cos\theta, \\ y &= \rho\sin\theta \end{aligned} \qquad \begin{aligned} \rho &= \sqrt{x^2+y^2}, \\ \theta &= \begin{cases} \operatorname{arctg}\dfrac{y}{x} & \text{при } x > 0, \\ \operatorname{arctg}\dfrac{y}{x} + \pi\operatorname{sgn} y & \text{при } x < 0, \\ \dfrac{\pi}{2}\operatorname{sgn} y & \text{при } x = 0. \end{cases} \end{aligned} \tag{7.5}$$

Формулы (7.5) приводят нас к *тригонометрической форме* представления комплексного числа $z = (x, y)$:

$$z = (x, y) = x + iy = (\rho\cos\theta, \rho\sin\theta) = \rho(\cos\theta + i\sin\theta). \tag{7.6}$$

В тригонометрической форме представления (7.6) число ρ называют *модулем*, а угол θ *аргументом* комплексного числа. Аргумент θ определен неоднозначно: вместо значения θ можно брать значение $\theta + 2\pi n$ (где $n = 0, \pm1, \pm2, \ldots$).

В тригонометрической форме удобно производить операции умножения и деления комплексных чисел.

Пусть даны два произвольных комплексных числа

$$\begin{aligned} z_1 &= (x_1, y_1) = (\rho_1\cos\theta_1, \rho_1\sin\theta_1), \\ z_2 &= (x_2, y_2) = (\rho_2\cos\theta_2, \rho_2\sin\theta_2). \end{aligned}$$

Тогда, по определению умножения (в силу формулы (7.2)), произведение этих чисел имеет вид

$$\begin{aligned} z_1 \cdot z_2 = (x_1x_2 - y_1y_2,\ x_1y_2 + x_2y_1) = (\rho_1\rho_2\cos\theta_1\cos\theta_2 - \\ - \rho_1\rho_2\sin\theta_1\sin\theta_2,\ \rho_1\rho_2\cos\theta_1\sin\theta_2 + \rho_1\rho_2\sin\theta_1\cos\theta_2) = \\ = [(\rho_1\rho_2)\cos(\theta_1+\theta_2),\ (\rho_1\rho_2)\sin(\theta_1+\theta_2)]. \end{aligned} \tag{7.7}$$

Аналогично из формулы (7.4) заключаем, что частное $\frac{z_1}{z_2}$ двух комплексных чисел $z_1 = (x_1, y_1) = (\rho_1\cos\theta_1,\ \rho_1\sin\theta_1)$ и $z_2 = (x_2, y_2) = (\rho_2\cos\theta_2,\ \rho_2\sin\theta_2)$ имеет вид [1]

$$\frac{z_1}{z_2} = \left[\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)\cos(\theta_1-\theta_2), \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)\sin(\theta_1-\theta_2)\right]. \tag{7.8}$$

[1]) При этом предполагается, что комплексное число z_2 не равно нулю, т. е. $\rho_2 \neq 0$.

Из формул (7.7) и (7.8) заключаем, что *при умножении двух комплексных чисел их модули перемножаются, а аргументы складываются* (*при делении двух комплексных чисел их модули делятся, а аргументы вычитаются*). Это свойство последовательно переносится на случай произведения любого конечного числа комплексных чисел. В частности, если перемножаются n равных комплексных чисел (т. е. если комплексное число возводится в степень n), то

$$(\rho\cos\theta,\ \rho\sin\theta)^n = (\rho^n\cos\theta n,\ \rho^n\sin\theta n). \tag{7.9}$$

Из формулы (7.9) при $\rho = 1$ получим так называемую *формулу Муавра*[1])

$$(\cos\theta,\ \sin\theta)^n = (\cos\theta n,\ \sin\theta n). \tag{7.10}$$

Формулу (7.10) можно записать и в другом представлении:

$$(\cos\theta + i\sin\theta)^n = \cos\theta n + i\sin\theta n. \tag{7.11}$$

В заключение заметим, что комплексное число, записанное в тригонометрической форме, равно нулю в том и только в том случае, когда равен нулю его модуль. Отсюда и из того, что при перемножении комплексных чисел их модули перемножаются, вытекает, что *произведение нескольких комплексных чисел равно нулю лишь в том случае, когда равен нулю хотя бы один из сомножителей.*

§ 2. Алгебраические многочлены

1. *Алгебраическим многочленом* n-й степени называется выражение вида

$$f(z) = c_0 z^n + c_1 z^{n-1} + \ldots + c_{n-1}z + c_n, \tag{7.12}$$

где $z = (x, y) = x + iy$ — переменное комплексное число, а $c_0, c_1, \ldots, c_n$ — некоторые постоянные комплексные числа, первое из которых отлично от нуля. Как известно, любой алгебраический многочлен степени n можно поделить «столбиком» на другой алгебраический многочлен степени не выше чем n. Таким путем мы приходим к следующему утверждению: *каковы бы ни были два многочлена $f(z)$ и $\varphi(z)$ такие, что степень $\varphi(z)$ не выше, чем $f(z)$, справедливо равенство*

$$f(z) = \varphi(z)\cdot q(z) + r(z), \tag{7.13}$$

в котором $q(z)$ и $r(z)$ — некоторые многочлены, причем степень $q(z)$ равна разности степеней многочленов $f(z)$ и $\varphi(z)$, а степень $r(z)$ ниже степени $\varphi(z)$.

---

[1]) А. де Муавр — английский математик, по национальности француз (1667–1754).

По отношению к фигурирующим в равенстве (7.13) многочленам $f(z)$, $\varphi(z)$, $q(z)$ и $r(z)$ обычно применяют вполне понятные термины «делимое», «делитель», «частное» и «остаток».

Говорят, что многочлен $f(z)$ делится на многочлен $\varphi(z)$, если в полученной посредством деления столбиком формуле (7.13) остаток $r(z) = 0$.

Договоримся называть многочленом нулевой степени любую комплексную постоянную. Тогда совершенно ясно, *что любой многочлен делится на отличный от нуля многочлен нулевой степени.* Изучим вопрос о делимости многочлена $f(z)$ на многочлен первой степени $(z - b)$.

Определение. *Назовем комплексное число b корнем многочлена $f(z)$, если $f(b)$ равно нулю.*

Теорема 7.1. *Многочлен нулевой степени $f(z)$ делится на двучлен $(z - b)$ тогда и только тогда, когда b является корнем многочлена $f(z)$.*

Доказательство. Запишем для многочленов $f(z)$ и $\varphi(z) = (z - b)$ формулу (7.13). Поскольку степень остатка $r(z)$ в этой формуле *обязана быть ниже* степени делителя $\varphi(z) = z - b$, то $r(z)$ — *многочлен нулевой степени*, т. е. $r(z) = c = \text{const}$. Таким образом, формула (7.13) принимает вид

$$f(z) = (z - b) \cdot q(z) + c. \tag{7.14}$$

Полагая в формуле (7.14) $z = b$, найдем, что $c = f(b)$. По определению $f(z)$ делится на $z - b$ тогда и только тогда, когда остаток в формуле (7.14) $c = f(b)$ равен нулю, т. е. тогда и только тогда, когда b является корнем $f(z)$. Теорема доказана.

2. Естественно, возникает вопрос: всякий ли алгебраический многочлен имеет корни? Ответ на этот вопрос дает *основная теорема алгебры*[1]: *всякий многочлен ненулевой степени имеет хотя бы один корень.*

Опираясь на эту теорему, докажем, что *алгебраический многочлен n-й степени имеет точно n корней*[2]. В самом деле, пусть $f(z)$ — многочлен n-й степени. Согласно основной теореме алгебры $f(z)$ имеет хотя бы один корень b_1, т. е. для $f(z)$ справедливо представление

$$f(z) = (z - b_1) f_1(z), \tag{7.15^1}$$

в котором через $f_1(z)$ обозначен некоторый многочлен степени $(n - 1)$. Если $n \neq 1$, то, согласно основной теореме алгебры, $f_1(z)$ имеет хотя бы один корень b_2, т. е. для $f_1(z)$ справедливо

[1] Доказательство этой теоремы см. в выпуске «Функции комплексной переменной».

[2] При этом, конечно, мы считаем, что $n > 0$.

представление

$$f_1(z) = (z - b_2) f_2(z), \tag{7.15^2}$$

в котором через $f_2(z)$ обозначен некоторый многочлен степени $(n-2)$. Повторяя указанные рассуждения далее, мы получим представления

$$f_2(z) = (z - b_3) f_3(z), \tag{7.15^3}$$

$$\dots\dots\dots\dots$$

$$f_{n-1}(z) = (z - b_n) f_n(z). \tag{7.15^n}$$

В последнем из этих представлений через $f_n(z)$ обозначен некоторый многочлен нулевой степени, т. е. $f_n(z) = c = \text{const}$. Сопоставляя между собой равенства (7.15^1)–(7.15^n) и учитывая, что $f_n(z) = c$, будем иметь

$$f(z) = (z - b_1)(z - b_2)\dots(z - b_n)c. \tag{7.16}$$

Отметим, что комплексная постоянная c не равна нулю, ибо в противном случае многочлен $f(z)$ был бы тождественно равен нулю и не являлся бы многочленом n-й степени [1]).

Из равенства (7.16) очевидно, что $f(b_1) = f(b_2) = \dots \dots = f(b_n) = 0$, т. е. каждое из чисел $b_1, b_2, \dots, b_n$ является корнем многочлена $f(z)$. Кроме того, из (7.16) очевидно, что, каково бы ни было комплексное число b, отличное от $b_1, b_2, \dots, b_n$, комплексное число $f(b)$ не равно нулю, ибо произведение нескольких комплексных чисел равно нулю лишь в том случае, когда равен нулю хотя бы один из сомножителей (см. § 1). Таким образом, многочлен $f(z)$ имеет ровно n корней: $b_1, b_2, \dots, b_n$.

Равенство (7.16) дает разложение многочлена $f(z)$ на множители. Если известен вид многочлена $f(z)$ (7.12), то мы можем определить постоянную c в равенстве (7.16). Сравнивая в равенствах (7.16) и (7.12) коэффициенты при z^n, получим $c = c_0$ [2]).

Многочлен (7.12), у которого $c_0 = 1$, называется *приведенным*. Для приведенного многочлена формула разложения (7.16)

---

[1]) Здесь мы используем следующее утверждение: *если многочлен* $f(z) = a_0 z^n + a_1 z^{n-1} + \dots + a_{n-1} z + a_n$ *тождественно равен нулю, то все его коэффициенты равны нулю.* В самом деле, если $f(z) \equiv 0$, то при $z = 0$ получим $a_n = 0$. Но тогда $f(z) \equiv z[a_0 z^{n-1} + a_1 z^{n-2} + \dots + a_{n-1}] \equiv 0$. Так как $z \not\equiv 0$, то выражение в квадратных скобках тождественно равно нулю, откуда при $z = 0$ получим $a_{n-1} = 0$. Продолжая аналогичные рассуждения далее, докажем, что все коэффициенты равны нулю.

[2]) Здесь мы используем утверждение: *если два многочлена* $a_0 z^n + a_1 z^{n-1} + \dots + a_n$ *и* $b_0 z^n + b_1 z^{n-1} + \dots + b_n$ *тождественно равны друг другу,* то $a_0 = b_0$, $a_1 = b_1$, …, $a_n = b_n$. Для доказательства достаточно к разности указанных многочленов применить утверждение, отмеченное в сноске [1]) на этой странице.

принимает вид

$$f(z) = (z - b_1)(z - b_2)\ldots(z - b_n). \tag{7.17}$$

Сравнивая формулу (7.17) с формулой (7.12) (при $c_0 = 1$), получим следующие соотношения:

$$c = -(b_1 + b_2 + \ldots + b_n),$$

$$c_2 = +(b_1 b_2 + b_1 b_3 + \ldots + b_{n-1} b_n),$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

$$c_n = (-1)^n b_1 b_2 \ldots b_n.$$

В дальнейшем, если не оговорено противное, мы будем рассматривать *приведенные многочлены.*

§ 3. Кратные корни многочлена. Признак кратности корня

Среди корней многочлена $f(z)$ могут быть *совпадающие корни.* Пусть $a, b, \ldots, c$ — *различные* корни приведенного многочлена $f(z)$. Тогда в силу результатов предыдущего параграфа для $f(z)$ справедливо разложение

$$f(z) = (z - a)^{\alpha}(z - b)^{\beta}\ldots(z - c)^{\gamma}. \tag{7.18}$$

В этом разложении $\alpha, \beta, \ldots, \gamma$ — некоторые целые числа, каждое из которых не меньше единицы, причем $\alpha + \beta + \ldots + \gamma = n$, где n — степень многочлена $f(z)$.

Если для многочлена $f(z)$ справедливо разложение (7.18), *то говорят, что комплексное число a является корнем $f(z)$ кратности α, комплексное число b является корнем $f(z)$ кратности $\beta, \ldots$, комплексное число c является корнем $f(z)$ кратности γ.*

Корень, кратность которого равна единице, принято называть *однократным,* а корень, кратность которого больше единицы, принято называть *кратным.*

Можно дать и другое эквивалентное определение корня данной кратности: *комплексное число a называется корнем многочлена $f(z)$ кратности α, если для $f(z)$ справедливо представление*

$$f(z) = (z - a)^{\alpha}\varphi(z), \quad \text{где} \quad \varphi(\alpha) \neq 0. \tag{7.19}$$

Наша цель — указать необходимое и достаточное условие для того, чтобы комплексное число a являлось корнем многочлена $f(z)$ кратности α.

Назовем производной многочлена $f(z)$ многочлен $f'(z)$, полученный формальным дифференцированием[1] *$f(z)$ по z.* Прежде всего докажем следующее утверждение.

[1] Дифференцирование $f(z)$ по z производится так, как если бы z была вещественной переменной.

Лемма 1. *Если комплексное число a является корнем кратности α многочлена $f(z)$, то это же число a является корнем кратности $(\alpha-1)$ многочлена $f'(z)$.*

Замечание. В частности, при $\alpha=1$ число a, будучи однократным корнем $f(z)$, не является корнем $f'(z)$.

Доказательство. По условию для $f(z)$ справедливо представление (7.19). Дифференцируя формулу (7.19), будем иметь

$$f'(z)=\alpha(z-a)^{\alpha-1}\varphi(z)+(z-a)^{\alpha}\varphi'(z),$$

или

$$f'(z)=(z-a)^{\alpha-1}\varphi_1(z), \tag{7.20}$$

где

$$\varphi_1(z)=\alpha\varphi(z)+(z-a)\varphi'(z).$$

Поскольку $\varphi_1(a)=\alpha\varphi(a)\neq 0$, то представление (7.20) означает, что число a является корнем кратности $(\alpha-1)$ многочлена $f'(z)$. Лемма доказана.

Теорема 7.2. *Для того чтобы комплексное число a являлось корнем кратности α многочлена $f(z)$, необходимо и достаточно, чтобы были выполнены следующие условия:*

$$f(a)=f'(a)=\ldots=f^{(\alpha-1)}(a)=0, \quad f^{(\alpha)}(a)\neq 0. \tag{7.21}$$

Доказательство. 1) Необходимость. Пусть a является корнем кратности α многочлена $f(z)$. Тогда, согласно лемме 1, это же число a является корнем кратности $(\alpha-1)$ многочлена $f'(z)$, корнем кратности $(\alpha-2)$ многочлена $f^{(2)}(z)$, ..., корнем кратности единица многочлена $f^{(\alpha-1)}(z)$, т. е.

$$f(a)=f'(a)=\ldots=f^{(\alpha-1)}(a)=0.$$

Согласно замечанию к лемме 1 число a не является корнем многочлена $f^{(\alpha)}(z)$, т. е. $f^{(\alpha)}(a)\neq 0$. Выполнение условий (7.21) доказано.

2) Достаточность. Пусть выполнены условия (7.21). Требуется доказать, что число a является корнем кратности α многочлена $f(z)$. Так как $f^{(\alpha-1)}(a)=0$, число a является корнем многочлена $f^{(\alpha-1)}(z)$ *кратности не ниже единицы*. Стало быть, на основании леммы 1 число a является корнем многочлена $f^{(\alpha-2)}(z)$ *кратности не ниже двух*, корнем многочлена $f^{(\alpha-3)}(z)$ *кратности не ниже трех*, ..., корнем многочлена $f(z)$ *кратности не ниже α*.

Остается доказать, что кратность корня a многочлена $f(z)$ *не выше α*. Если бы эта кратность была выше α, то, согласно лемме 1, кратность корня a многочлена $f^{(\alpha-1)}(z)$ была бы выше

единицы, откуда следовало бы, что a является корнем $f^{(\alpha)}(z)$, т. е. $f^{(\alpha)}(a)=0$, что противоречит последнему из условий (7.21). Теорема доказана.

§ 4. Принцип выделения кратных корней. Алгоритм Евклида

1. Принцип выделения кратных корней. Поставим перед собой цель — для данного многочлена $f(z)$, имеющего, вообще говоря, кратные корни, найти такой многочлен $F(z)$, который *имеет те же самые корни, что и $f(z)$, но все кратности единица.* Для достижения этой цели введем некоторые новые понятия.

Определение 1. *Назовем делителем двух многочленов $f(z)$ и $\varphi(z)$ любой многочлен, на который делятся оба многочлена $f(z)$ и $\varphi(z)$.*

Определение 2. *Назовем наибольшим общим делителем двух многочленов $f(z)$ и $\varphi(z)$ такой их делитель, который делится на любой другой делитель этих двух многочленов.*

Договоримся обозначать наибольший общий делитель двух многочленов $f(z)$ и $\varphi(z)$ символом $D[f(z),\varphi(z)]$.

Заметим, что из определения наибольшего общего делителя вытекает, что он определен с точностью до произвольного постоянного множителя.

Возвращаясь к цели, сформулированной в начале настоящего параграфа, мы теперь легко можем проверить, что искомый многочлен $F(z)$ имеет вид

$$F(z)=\frac{f(z)}{D[f(z),f'(z)]}. \tag{7.22}$$

В самом деле, пусть

$$f(z)=(z-a)^{\alpha}(z-b)^{\beta}\ldots(z-c)^{\gamma}, \tag{7.23}$$

где $a,b,\ldots,c$ — *различные* корни. Тогда, согласно теореме 7.2, для многочлена $f'(z)$ справедливо представление

$$f'(z)=(z-a)^{\alpha-1}(z-b)^{\beta-1}\ldots(z-c)^{\gamma-1}\psi(z), \tag{7.24}$$

где $\psi(z)$ не содержит множителей $(z-a)$, $(z-b)$, ..., $(z-c)$.

Из сопоставления формул (7.23) и (7.24) очевидно, что

$$D[f(z),f'(z)]=(z-a)^{\alpha-1}(z-b)^{\beta-1}\ldots(z-c)^{\gamma-1}. \tag{7.25}$$

Из сопоставления формул (7.23) и (7.25) в свою очередь очевидно, что многочлен $F(z)$, определяемый формулой (7.22), имеет вид

$$F(z)=(z-a)(z-b)\ldots(z-c). \tag{7.26}$$

Тем самым доказано, что многочлен $F(z)$, определяемый формулой (7.22), имеет те же самые корни, что и многочлен $f(z)$, но все кратности единица.

Таким образом, задача выделения кратных корней сводится к построению по данному многочлену $f(z)$ многочлена $F(z)$, определяемого формулой (7.22).

Поскольку знаменатель формулы (7.22) содержит наибольший общий делитель двух многочленов $f(z)$ и $f'(z)$, возникает задача о нахождении наибольшего общего делителя двух многочленов. Переходим к решению этой задачи.

2. Нахождение наибольшего общего делителя двух многочленов (алгоритм Евклида). Пусть даны два совершенно произвольных многочлена $f(z)$ и $\varphi(z)$ и требуется найти их наибольший общий делитель. Не ограничивая общности, будем считать, что степень $\varphi(z)$ не выше степени $f(z)$. Тогда, поделив $f(z)$ на $\varphi(z)$ столбиком, мы придем к формуле (7.13) (см. § 2)

$$f(z) = \varphi(z)q(z) + r_1(z), \tag{7.27^1}$$

в которой, как установлено в § 2, степень остатка $r_1(z)$ меньше степени делителя $\varphi(z)$. Это дает нам право снова поделить столбиком $\varphi(z)$ на $r_1(z)$. В результате этого деления мы получим формулу, аналогичную формуле (7.13):

$$\varphi(z) = r_1(z)q_1(z) + r_2(z), \tag{7.27^2}$$

в которой степень остатка $r_2(z)$ ниже степени делителя $r_1(z)$.

Далее мы делим столбиком $r_1(z)$ на $r_2(z)$ и т. д. В результате получим

$$r_1(z) = r_2(z)q_2(z) + r_3(z), \tag{7.27^3}$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$r_{k-2}(z) = r_{k-1}(z)q_{k-1}(z) + r_k(z). \tag{7.27^k}$$

Поскольку при каждом делении столбиком степень остатка будет снижаться *по крайней мере на единицу*, повторив описанный процесс достаточно большое число k раз, мы на $(k+1)$-м шагу получим остаток, равный нулю [1]), т. е.

$$r_{k-1}(z) = r_k(z)q_k(z). \tag{7.27^{k+1}}$$

Докажем, что последний отличный от нуля остаток $r_k(z)$ является *наибольшим общим делителем многочленов* $f(z)$ и $\varphi(z)$.

Достаточно доказать два утверждения:

---

[1]) Если остаток не обратится в нуль в одном из промежуточных звеньев описанного процесса, то после некоторого количества k шагов мы получим остаток $r_k(z)$ нулевой степени. Тогда следующий остаток $r_{k+1}(z)$ заведомо равен нулю (ибо любой многочлен делится на многочлен нулевой степени).

1) многочлены $f(z)$ и $\varphi(z)$ делятся на $r_k(z)$ (это означает, что $r_k(z)$ является одним из делителей $f(z)$ и $\varphi(z)$);

2) многочлен $r_k(z)$ делится на *любой* делитель $r_0(z)$ многочленов $f(z)$ и $\varphi(z)$ (это означает, что $r_k(z)$ — *наибольший общий делитель* указанных многочленов).

Для доказательства утверждения 1) заметим, что, в силу (7.27^{k+1}), $r_{k-1}(z)$ делится на $r_k(z)$, а тогда, в силу (7.27^k), $r_{k-2}(z)$ делится на $r_k(z)$ ... Поднимаясь вверх по цепочке равенств (7.27^1)–(7.27^k), мы, наконец, докажем, что $\varphi(z)$ и $f(z)$ делятся на $r_k(z)$.

Докажем теперь утверждение 2). Пусть $r_0(z)$ — любой делитель многочленов $f(z)$ и $\varphi(z)$. В силу равенства (7.27^1) $r_1(z)$ делится на $r_0(z)$, а тогда, в силу равенства (7.27^2), $r_2(z)$ делится на $r_0(z)$, в силу равенства (7.27^3) $r_3(z)$ делится на $r_0(z)$ ... Опускаясь по цепочке равенств (7.27^1)–(7.27^k), мы, наконец, докажем, что $r_k(z)$ делится на $r_0(z)$.

Тем самым мы полностью обосновали описанный выше процесс нахождения наибольшего общего делителя двух многочленов. Этот процесс обычно называют *алгоритмом Евклида.*

П р и м е р. Найдем наибольший общий делитель двух многочленов [1])

$$f(z) = z^4 - 2z^3 + 3z^2 - 2z + 1 \quad \text{и} \quad \varphi(z) = 4z^3 - 6z^2 + 6z - 2.$$

Поделив $f(z)$ на $\varphi(z)$ столбиком, будем иметь

$$\begin{array}{r|l}
z^4 - 2z^3 + 3z^2 - 2z + 1 & 4z^3 - 6z^2 + 6z - 2 \\ \cline{2-2}
-\quad z^4 - \frac{3}{2}z^3 + \frac{3}{2}z^2 - \frac{1}{2}z & \frac{1}{4}z - \frac{1}{8} \\ \cline{1-1}
-\frac{1}{2}z^3 + \frac{3}{2}z^2 - \frac{3}{2}z + 1 & \\
-\quad -\frac{1}{2}z^3 + \frac{3}{4}z^2 - \frac{3}{4}z + \frac{1}{4} & \\ \cline{1-1}
\frac{3}{4}z^2 - \frac{3}{4}z + \frac{3}{4} &
\end{array}$$

Далее мы должны были бы поделить $\varphi(z)$ на обведенный пунктиром многочлен. Однако, поскольку наибольший общий делитель *определен с точностью до произвольного постоянного множителя*, удобно умножить обведенный пунктиром остаток на $4/3$ и поделить $\varphi(z)$ на многочлен $z^2 - z + 1$. В результате

[1]) Легко видеть, что $\varphi(z) = f'(z)$.

получим

$$\begin{array}{r|l} -\begin{array}{r} 4z^3-6z^2+6z-2 \\ 4z^3-4z^2+4z \end{array} & z^2-z+1 \\ \cline{2-2} \hline -\begin{array}{r} -2z^2+2z-2 \\ -2z^2+2z-2 \end{array} & 4z-2 \\ \hline \end{array}$$

остаток равен нулю.

Таким образом, наибольший общий делитель многочленов $f(z)$ и $\varphi(z)$ равен $z^2 - z + 1$, т. е.

$$D[f(z), \varphi(z)] = z^2 - z + 1.$$

З а м е ч а н и е 1. В приведенном выше примере мы для простоты взяли многочлены $f(z)$ и $\varphi(z)$ с *вещественными* коэффициентами. Та же методика сохраняет силу и для многочленов с комплексными коэффициентами.

З а м е ч а н и е 2. Следует отметить, что до настоящего времени практически отсутствуют устойчивые численные методы вычисления корней произвольных многочленов с заданной точностью. Однако, имея предварительную информацию о расположении искомого корня многочлена на некотором сегменте числовой оси, мы можем вычислить этот корень с интересующей нас точностью с помощью методов, изложенных в § 1 гл. 12.

§ 5. Разложение правильной рациональной дроби с комплексными коэффициентами на сумму простейших дробей

Рациональной д р о б ь ю называется отношение двух алгебраических многочленов. Рациональная дробь называется *правильной*, если степень многочлена, стоящего в числителе, меньше степени многочлена, стоящего в знаменателе. В противном случае рациональная дробь называется *неправильной*. Как правило, мы будем обозначать рациональную дробь символом $\frac{P(z)}{Q(z)}$, понимая под $P(z)$ и $Q(z)$ алгебраические многочлены.

Лемма 2. *Пусть* $\frac{P(z)}{Q(z)}$ *— правильная рациональная дробь, знаменатель которой имеет корнем кратности* α *комплексное число* a, *т. е.*

$$Q(z) = (z-a)^{\alpha}\varphi(z), \quad где \quad \varphi(a) \neq 0. \tag{7.28}$$

Тогда для этой дроби справедливо следующее представление:

$$\frac{P(z)}{Q(z)} = \frac{A}{(z-a)^{\alpha}} + \frac{\psi(z)}{(z-a)^{\alpha-k}\varphi(z)}, \tag{7.29}$$

в котором A — комплексная постоянная, равная $\dfrac{P(a)}{\varphi(a)}$, k — целое число $\geqslant 1$, а $\psi(z)$ — некоторый многочлен, причем последняя дробь в правой части (7.29) является правильной.

Доказательство. Обозначив через A постоянное число вида $A = \dfrac{P(a)}{\varphi(a)}$ [1]), рассмотрим разность

$$\frac{P(z)}{Q(z)} - \frac{A}{(z-a)^\alpha}.$$

Приводя указанную разность к общему знаменателю, будем иметь

$$\frac{P(z)}{Q(z)} - \frac{A}{(z-a)^\alpha} = \frac{P(z) - A\varphi(z)}{(z-a)^\alpha \varphi(z)} = \frac{\Phi(z)}{(z-a)^\alpha \varphi(z)}, \tag{7.30}$$

где через $\Phi(z)$ обозначен многочлен вида $\Phi(z) = P(z) - A\varphi(z)$. Поскольку $\Phi(a) = P(a) - A\varphi(a) = 0$, комплексное число *$a$ является корнем многочлена $\Phi(z)$* некоторой кратности $k \geqslant 1$, т. е.

$$\Phi(z) = (z-a)^k \psi(z), \quad \text{где} \quad \psi(a) \neq 0. \tag{7.31}$$

Вставляя представление (7.31) в формулу (7.30), будем иметь

$$\frac{P(z)}{Q(z)} - \frac{A}{(z-a)^\alpha} = \frac{\psi(z)}{(z-a)^{\alpha-k}\varphi(z)}. \tag{7.32}$$

Тем самым формула (7.29) доказана. Остается только убедиться в том, что дробь, стоящая в правой части (7.32), является правильной. Это непосредственно вытекает из того, что *разность двух правильных дробей является правильной дробью* [2]).

Лемма 2 доказана.

Из леммы 2 непосредственно вытекает следующая замечательная теорема, устанавливающая факт разложимости правильной рациональной дроби на сумму простейших дробей.

Теорема 7.3. *Пусть $\dfrac{P(z)}{Q(z)}$ — правильная рациональная дробь, знаменатель которой имеет вид*

$$Q(z) = (z-a)^\alpha (z-b)^\beta \ldots (z-c)^\gamma. \tag{7.33}$$

Тогда для этой дроби справедливо следующее представление:

$$\begin{aligned}\frac{P(z)}{Q(z)} = \frac{A_1}{(z-a)^\alpha} + \frac{A_2}{(z-a)^{\alpha-1}} + \ldots + \frac{A_\alpha}{(z-a)} &+ \\ + \frac{B_1}{(z-b)^\beta} + \frac{B_2}{(z-b)^{\beta-1}} + \ldots + \frac{B_\beta}{(z-b)} &+ \\ + \ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots &+ \\ + \frac{C_1}{(z-c)^\gamma} + \frac{C_2}{(z-c)^{\gamma-1}} + \ldots + \frac{C_\gamma}{(z-c)}&.\end{aligned} \tag{7.34}$$

[1]) Число A имеет смысл, ибо $\varphi(a) \neq 0$ в силу (7.28).

[2]) В этом легко убедиться, приводя разность правильных дробей к общему знаменателю.

В этом представлении $A_1, A_2, \ldots, A_\alpha, B_1, B_2, \ldots, B_\beta, \ldots, C_1, C_2, \ldots, C_\gamma$ *— некоторые постоянные комплексные числа, часть из которых может быть равна нулю.*

Доказательство. Сначала применим лемму 2 к дроби $\frac{P(z)}{Q(z)}$, имея в виду, что комплексное число a является корнем $Q(z)$ кратности α. При этом получим равенство (7.32). К правой части этого равенства снова применим лемму 2, имея в виду, что либо комплексное число a является корнем знаменателя указанной правой части кратности $\alpha - k$ (при $\alpha - k > 0$), либо, в силу разложения (7.33), комплексное число b является корнем этого знаменателя кратности β (при $\alpha - k = 0$). В результате получим равенство, аналогичное (7.32), к правой части которого снова можно применить лемму 2. Продолжая аналогичные рассуждения далее (т. е. последовательно применяя лемму 2 по всем корням $Q(z)$), получим для дроби $\frac{P(z)}{Q(z)}$ представление (7.34). Теорема доказана.

Замечание. Поскольку в лемме 2 число k может быть больше единицы и многочлен $P(z)$ может иметь корни, совпадающие с корнями $Q(z)$, то часть коэффициентов $A_1, \ldots, A_\alpha, B_1, \ldots, B_\beta, C_1, \ldots, C_\gamma$ в формуле (7.34) может быть равна нулю.

§ 6. Разложение алгебраического многочлена с вещественными коэффициентами на произведение неприводимых вещественных множителей

Выше мы изучали разложение на сумму простейших дробей рациональной дроби с *комплексными* коэффициентами. Нашей окончательной целью является разложение рациональной дроби с *вещественными* коэффициентами на сумму простейших дробей с *вещественными* коэффициентами.

Для достижения этой цели мы должны прежде всего найти разложение алгебраического многочлена с вещественными коэффициентами на произведение неприводимых вещественных множителей. Этому и посвящен настоящий параграф.

Пусть

$$f(z) = z^n + c_1 z^{n-1} + c_2 z^{n-2} + \ldots + c_n \tag{7.35}$$

— приведенный алгебраический многочлен с *вещественными* коэффициентами $c_1, c_2, \ldots, c_n$.

Прежде всего докажем следующую теорему.

Теорема 7.4. *Если комплексное число a является корнем алгебраического многочлена с вещественными коэффициента-*

ми (7.35), *то и сопряженное ему комплексное число*[1] $\overline{a}$ *также является корнем многочлена* (7.35). *Более того, если комплексный корень a имеет кратность λ, то и корень $\overline{a}$ имеет кратность λ.*

Доказательство. Прежде всего докажем следующее вспомогательное утверждение: если $f(z)$ — многочлен с вещественными коэффициентами, то комплексная величина $f(\overline{z})$ является сопряженной по отношению к величине $f(z)$. Достаточно доказать, что для любого номера n величина $(\overline{z})^n$ является сопряженной по отношению к величине z^n. Это последнее непосредственно вытекает из тригонометрической формы комплексного числа. В самом деле, пусть

$$z = \rho(\cos\theta + i\sin\theta).$$

Тогда

$$\overline{z} = \rho[\cos(-\theta) + i\sin(-\theta)].$$

В силу формулы Муавра (7.11)

$$z^n = \rho^n(\cos\theta n + i\sin\theta n),$$

$$(\overline{z})^n = \rho^n[\cos(-\theta n) + i\sin(-\theta n)] = \rho^n(\cos\theta n - i\sin\theta n).$$

Из сопоставления двух последних формул вытекает, что $(\overline{z})^n$ является величиной, сопряженной по отношению к z^n. Вспомогательное утверждение доказано.

Пусть теперь комплексное число a является корнем многочлена $f(z)$, т. е. $f(a) = 0$. В § 1 этой главы мы установили, что комплексное число равно нулю тогда и только тогда, когда равно нулю сопряженное ему число. Стало быть, из равенства $f(a) = 0$ и из доказанного выше вспомогательного утверждения вытекает, что $f(\overline{a}) = 0$, т. е. число $\overline{a}$ является корнем $f(z)$.

Пусть дано, что кратность корня a равна λ. Тогда в силу теоремы 7.2

$$f(a) = f'(a) = f^{(2)}(a) = \ldots = f^{(\lambda-1)}(a) = 0;\ f^{(\lambda)}(a) \neq 0. \quad (7.36)$$

Так как комплексное число равно нулю тогда и только тогда, когда равно нулю сопряженное ему число, то из доказанного выше вспомогательного утверждения и из соотношений (7.36) вытекают следующие соотношения[2]:

$$f(\overline{a}) = f'(\overline{a}) = f^{(2)}(\overline{a}) = \ldots = f^{(\lambda-1)}(\overline{a}) = 0,\ f^{(\lambda)}(\overline{a}) \neq 0. \quad (7.37)$$

---

[1] Всюду в дальнейшем мы будем обозначать комплексное число, сопряженное данному, тем же символом, что и данное число, но с черточкой наверху.

[2] При этом мы учитываем, что производная многочлена с вещественными коэффициентами представляет собой многочлен также с вещественными коэффициентами.

В силу теоремы 7.2 соотношения (7.37) означают, что число $\overline{a}$ является корнем $f(z)$ кратности λ. Теорема 7.4 доказана.

Пользуясь теоремой 7.4, найдем разложение многочлена с вещественными коэффициентами [1] $f(x)$ на произведение неприводимых вещественных множителей. Пусть многочлен $f(x)$ имеет вещественные корни $b_1, b_2, \ldots, b_m$ кратности $\beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_m$ соответственно и комплексно сопряженные пары корней a_1 и $\overline{a}_1$, a_2 и $\overline{a}_2$, ..., a_n и $\overline{a}_n$ кратности $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_n$ каждая пара соответственно.

Тогда, согласно результатам § 3, многочлен $f(x)$ может быть представлен в виде

$$f(x) = (x - b_1)^{\beta_1}(x - b_2)^{\beta_2} \ldots (x - b_m)^{\beta_m}(x - a_1)^{\lambda_1}(x - \overline{a}_1)^{\lambda_1} \times \\ \times (x - a_2)^{\lambda_2}(x - \overline{a}_2)^{\lambda_2} \ldots (x - a_n)^{\lambda_n}(x - \overline{a}_n)^{\lambda_n}. \quad (7.38)$$

Обозначим вещественную и мнимую части корня a_k $(k = 1, 2, \ldots, n)$ соответственно через u_k и v_k, т. е. пусть $a_k = u_k + iv_k$. Тогда $\overline{a}_k = u_k - iv_k$. Преобразуем для любого $k = 1, 2, \ldots, n$ выражение

$$(x - a_k)^{\lambda_k}(x - \overline{a}_k)^{\lambda_k} = [(x - a_k)(x - \overline{a}_k)]^{\lambda_k} = \\ = [(x - u_k - iv_k)(x - u_k + iv_k)]^{\lambda_k} = [(x - u_k)^2 + v_k^2]^{\lambda_k} = \\ = (x^2 + p_k x + q_k)^{\lambda_k}, \quad (7.39)$$

где

$$p_k = -2u_k, \quad q_k = u_k^2 + v_k^2.$$

Вставляя (7.39) в (7.38), окончательно получим следующее разложение многочлена $f(x)$ на произведение вещественных неприводимых множителей:

$$f(x) = (x - b_1)^{\beta_1}(x - b_2)^{\beta_2} \ldots (x - b_m)^{\beta_m}(x^2 + p_1 x + q_1)^{\lambda_1} \times \\ \times (x^2 + p_2 x + q_2)^{\lambda_2} \ldots (x^2 + p_n x + q_n)^{\lambda_n}. \quad (7.40)$$

Мы приходим к выводу, что многочлен $f(x)$ с вещественными коэффициентами распадается на произведение (7.40) неприводимых вещественных множителей, причем множители, соответствующие вещественным корням, имеют вид двучленов в степенях, равных кратности корней, а множители, соответствующие комплексным парам корней, имеют вид квадратных трехчленов в степенях, равных кратности этих пар корней.

---

[1] В дальнейшем нам придется иметь дело с многочленами от переменной, принимающей *лишь вещественные значения*. Поэтому для ее обозначения удобнее пользоваться буквой x, а не z.

§ 7. Разложение правильной рациональной дроби с вещественными коэффициентами на сумму простейших дробей с вещественными коэффициентами

Имеют место следующие два утверждения.

Лемма 3. *Пусть* $\dfrac{P(x)}{Q(x)}$ *— правильная рациональная дробь с вещественными коэффициентами, знаменатель которой имеет вещественное число* a *корнем кратности* α, *т. е.*

$$Q(x) = (x-a)^{\alpha}\varphi(x), \quad \text{где} \quad \varphi(a) \neq 0.$$

Тогда для этой дроби справедливо следующее представление:

$$\frac{P(x)}{Q(x)} = \frac{A}{(x-a)^{\alpha}} + \frac{\psi(x)}{(x-a)^{\alpha-k}\varphi(x)}. \tag{7.41}$$

В этом представлении A *— вещественное число, равное* $A = \dfrac{P(a)}{\varphi(a)}$, k *— целое число* $\geqslant 1$, *а* $\psi(x)$ *— некоторый многочлен с вещественными коэффициентами, причем последняя дробь в правой части* (7.41) *является правильной.* Лемма 3 доказательства не требует, так как непосредственно вытекает из леммы 2. Следует только учесть, что, поскольку $P(x)$ и $Q(x)$ — многочлены с вещественными коэффициентами, а a — вещественный корень, многочлены $\varphi(x)$ и $\psi(x)$ также имеют вещественные коэффициенты и, стало быть, постоянная $A = \dfrac{P(a)}{\varphi(a)}$ является вещественной.

Лемма 4. *Пусть* $\dfrac{P(x)}{Q(x)}$ *— правильная рациональная дробь с вещественными коэффициентами, знаменатель которой* $Q(x)$ *имеет комплексные числа* $a = u + iv$ *и* $\overline{a} = u - iv$ *корнями кратности* λ, *т. е.*

$$Q(x) = (x^2+px+q)^{\lambda}\varphi(x), \quad \text{где} \quad \varphi(a) \neq 0, \quad \varphi(\overline{a}) \neq 0,$$

$$p = -2u, \quad q = u^2 + v^2. \tag{7.42}$$

Тогда для этой дроби справедливо следующее представление:

$$\frac{P(x)}{Q(x)} = \frac{Mx+N}{(x^2+px+q)^{\lambda}} + \frac{\psi(x)}{(x^2+px+q)^{\lambda-k}\varphi(x)}. \tag{7.43}$$

В этом представлении M *и* N *— некоторые вещественные постоянные,* k *— целое число* $\geqslant 1$, *а* $\psi(x)$ *— некоторый многочлен с вещественными коэффициентами, причем последняя дробь в правой части* (7.43) *является правильной.*

Доказательство леммы 4. Договоримся обозначать вещественную часть комплексной величины A символом $\mathrm{Re}\,[A]$, мнимую часть комплексной величины A символом

$\operatorname{Im}[A]$. Положим [1]

$$M = \frac{1}{v}\operatorname{Im}\left[\frac{P(a)}{\varphi(a)}\right], \quad N = \operatorname{Re}\left[\frac{P(a)}{\varphi(a)}\right] - \frac{u}{v}\operatorname{Im}\left[\frac{P(a)}{\varphi(a)}\right].$$

Нетрудно проверить, что указанные M и N являются решением следующего уравнения:

$$P(a) - (Ma + N)\varphi(a) = 0. \tag{7.44}$$

В самом деле, поделив это уравнение на $\varphi(a)$, и приравняв нулю действительные и мнимые части, мы получим два равенства

$$Mu + N = \operatorname{Re}\left[\frac{P(a)}{\varphi(a)}\right],$$

$$Mv = \operatorname{Im}\left[\frac{P(a)}{\varphi(a)}\right],$$

из которых определяются написанные выше M и N. Рассмотрим теперь разность

$$\frac{P(x)}{Q(x)} - \frac{Mx + N}{(x^2 + px + q)^\lambda}.$$

Приводя указанную разность к общему знаменателю, будем иметь

$$\frac{P(x)}{Q(x)} - \frac{Mx + N}{(x^2 + px + q)^\lambda} = \frac{P(x) - (Mx + N)\varphi(x)}{(x^2 + px + q)^\lambda \varphi(x)} = \frac{\Phi(x)}{(x^2 + px + q)^\lambda \varphi(x)}. \tag{7.45}$$

Здесь через $\Phi(x)$ обозначен многочлен с вещественными коэффициентами вида $\Phi(x) = P(x) - (Mx + N)\varphi(x)$. Равенство (7.44) позволяет утверждать, что комплексное число a, а стало быть, в силу теоремы 7.4, и сопряженное ему число $\overline{a}$ являются корнями многочлена $\Phi(x)$ некоторой кратности $k \geqslant 1$. В таком случае для многочлена $\Phi(x)$ справедливо представление

$$\Phi(x) = (x^2 + px + q)^k \psi(x), \tag{7.46}$$

где $\psi(x)$ — некоторый многочлен с вещественными коэффициентами, не имеющий в качестве корней числа a и $\overline{a}$. Вставляя представление (7.46) в формулу (7.45), получим представление (7.43). Тот факт, что последняя дробь, стоящая в правой части (7.43), является правильной, вытекает из того, что эта дробь равна разности двух правильных дробей.

Лемма 4 доказана.

Последовательное применение лемм 3 и 4 к дроби $P(x)/Q(x)$ по всем корням знаменателя приводит нас к следующему замечательному утверждению.

---

[1] В силу (7.42) $\varphi(a) \neq 0$, так что отношение $P(a)/\varphi(a)$ рассматривать можно.

Теорема 7.5. *Пусть* $\dfrac{P(x)}{Q(x)}$ *— правильная рациональная дробь с вещественными коэффициентами, знаменатель которой имеет вид*

$$Q(x) = (x-b_1)^{\beta_1}(x-b_2)^{\beta_2}\dots(x-b_m)^{\beta_m}(x^2+p_1x+q_1)^{\lambda_1}\dots \\ \dots(x^2+p_nx+q_n)^{\lambda_n}.$$

Тогда для этой дроби справедливо следующее разложение на сумму простейших дробей:

$$\frac{P(x)}{Q(x)} = \frac{B_1^{(1)}}{(x-b_1)} + \frac{B_2^{(1)}}{(x-b_1)^2} + \dots + \frac{B_{\beta_1}^{(1)}}{(x-b_1)^{\beta_1}} + \dots \\ \dots + \frac{B_1^{(m)}}{(x-b_m)} + \frac{B_2^{(m)}}{(x-b_m)^2} + \dots + \frac{B_{\beta_m}^{(m)}}{(x-b_m)^{\beta_m}} + \\ + \frac{M_1^{(1)}x+N_1^{(1)}}{(x^2+p_1x+q_1)} + \frac{M_2^{(1)}x+N_2^{(1)}}{(x^2+p_1x+q_1)^2} + \dots + \frac{M_{\lambda_1}^{(1)}+N_{\lambda_1}^{(1)}}{(x^2+p_1x+q_1)^{\lambda_1}} + \dots \\ \dots + \frac{M_1^{(n)}x+N_1^{(n)}}{(x^2+p_nx+q_n)} + \frac{M_2^{(n)}x+N_2^{(n)}}{(x^2+p_nx+q_n)^2} + \dots + \frac{M_{\lambda_n}^{(n)}x+N_{\lambda_n}^{(n)}}{(x^2+p_nx+q_n)^{\lambda_n}}. \quad (7.47)$$

В этом разложении $B_1^{(1)}, B_2^{(1)}, \dots, B_{\beta_m}^{(m)}, M_1^{(1)}, N_1^{(1)}, \dots, M_{\lambda_n}^{(n)}, N_{\lambda_n}^{(n)}$ *— некоторые вещественные постоянные, часть из которых может быть равна нулю.*

З а м е ч а н и е. Для конкретного определения только что указанных постоянных следует привести равенство (7.47) к общему знаменателю и после этого сравнить коэффициенты при одинаковых степенях x в числителях.

П р и м е р ы и р а з ъ я с н е н и я.

1°. Разложить на сумму простейших правильную дробь

$$\frac{2x^3+4x^2+x+2}{(x-1)^2(x^2+x+1)}.$$

Убедившись в том, что квадратный трехчлен x^2+x+1 имеет комплексные корни, ищем, согласно теореме 7.5, разложение в виде

$$\frac{2x^3+4x^2+x+2}{(x-1)^2(x^2+x+1)} = \frac{B_1}{x-1} + \frac{B_2}{(x-1)^2} + \frac{Mx+N}{x^2+x+1}. \quad (7.48)$$

Приводя равенство (7.48) к общему знаменателю, получим

$$\frac{2x^3+4x^2+x+2}{(x-1)^2(x^2+x+1)} = \frac{B_1(x^3-1)+B_2(x^2+x+1)+(Mx+N)(x^2-2x+1)}{(x-1)^2(x^2+x+1)}.$$

Сравнивая в числителях коэффициенты при x^0, x^1, x^2 и x^3, при-

дем к системе уравнений [1])

$$\begin{aligned} B_1 + M &= 2, \\ B_2 + N - 2M &= 4, \\ B_2 + M - 2N &= 1, \\ -B_1 + B_2 + N &= 2. \end{aligned}$$

Решая эту систему, найдем $B_1 = 2$, $B_2 = 3$, $M = 0$, $N = 1$. Окончательно получим

$$\frac{2x^3 + 4x^2 + x + 2}{(x-1)^2(x^2+x+1)} = \frac{2}{x-1} + \frac{3}{(x-1)^2} + \frac{1}{x^2+x+1}. \tag{7.49}$$

Только что проиллюстрированный метод отыскания разложения правильной рациональной дроби называется *методом неопределенных коэффициентов*. Этот метод приводит к цели всегда; доказывать разрешимость полученной в результате применения этого метода системы уравнений не нужно — разрешимость вытекает из теоремы 7.5.

2°. Проиллюстрируем метод неопределенных коэффициентов еще одним примером. Требуется найти разложение правильной дроби

$$\frac{3x^4 + 2x^3 + 3x^2 - 1}{(x-2)(x^2+1)^2}.$$

Так как квадратный трехчлен $x^2 + 1$ имеет комплексные корни, ищем, согласно теореме 7.5, разложение в виде

$$\frac{3x^4 + 2x^3 + 3x^2 - 1}{(x-2)(x^2+1)^2} = \frac{B}{x-2} + \frac{M_1 x + N_1}{x^2+1} + \frac{M_2 x + N_2}{(x^2+1)^2}.$$

Последнее равенство приводим к общему знаменателю и после этого сопоставляем числители. Получим

$$3x^4 + 2x^3 + 3x^2 - 1 = B(x^4 + 2x^2 + 1) + \\ + (M_1 x + N_1)(x^3 - 2x^2 + x - 2) + (M_2 x + N_2)(x - 2).$$

Сравнивая коэффициенты при x^0, x^1, x^2, x^3 и x^4, придем к системе уравнений

$$\begin{aligned} B + M_1 &= 3, \\ N_1 - 2M_1 &= 2, \\ 2B + M_1 - 2N_1 + M_2 &= 3, \\ N_1 - 2M_1 + N_2 - 2M_2 &= 0, \\ B - 2N_1 - 2N_2 &= -1. \end{aligned}$$

[1]) При этом мы используем утверждение, сформулированное в сноске [2]) на с. 209.

Решая эту систему, найдем $B = 3$, $M_1 = 0$, $N_1 = 2$, $M_2 = 1$, $N_2 = 0$. Окончательно получим

$$\frac{3x^4 + 2x^3 + 3x^2 - 1}{(x-2)(x^2+1)^2} = \frac{3}{x-2} + \frac{2}{x^2+1} + \frac{x}{(x^2+1)^2}. \tag{7.50}$$

3°. Метод неопределенных коэффициентов, как видно из рассмотренных примеров, является довольно громоздким. Естественно поэтому в тех случаях, когда это возможно, найти другой, более простой метод отыскания коэффициентов в разложении правильной рациональной дроби на сумму простейших. Пусть знаменатель $Q(x)$ правильной рациональной дроби $P(x)/Q(x)$ имеет вещественное число a корнем кратности α. Тогда среди простейших дробей, на сумму которых раскладывается дробь $P(x)/Q(x)$, будет фигурировать дробь

$$\frac{A}{(x-a)^\alpha}. \tag{7.51}$$

Укажем совсем простой метод вычисления коэффициента A при этой простейшей дроби. Привлекая лемму 3 и формулу (7.41), мы убедимся в том, что коэффициент A равен

$$A = P(a)/\varphi(a), \quad \text{где} \quad \varphi(x) = Q(x)/(x-a)^\alpha.$$

Мы приходим к следующему правилу: *для вычисления коэффициента A при простейшей дроби* (7.51), *соответствующей вещественному корню a многочлена $Q(x)$ кратности α, следует вычеркнуть в знаменателе дроби $\dfrac{P(x)}{Q(x)}$ скобку $(x-a)^\alpha$ и в оставшемся выражении положить $x = a$.*

Указанный прием нахождения коэффициента A обычно называют *методом вычеркивания.* Отметим, что этот прием применим лишь для вычисления коэффициентов при *старших степенях простейших дробей, соответствующих вещественным корням $Q(x)$.*

Метод вычеркивания особенно эффективен в случае, когда знаменатель $Q(x)$ *имеет лишь однократные вещественные корни*, т. е. когда $Q(x) = (x-a_1)(x-a_2)\ldots(x-a_n)$. Тогда, как мы знаем, справедливо разложение

$$\frac{P(x)}{Q(x)} = \frac{A_1}{x-a_1} + \frac{A_2}{x-a_2} + \ldots + \frac{A_k}{x-a_k} + \ldots + \frac{A_n}{x-a_n},$$

все коэффициенты которого могут быть вычислены по методу вычеркивания. Для вычисления коэффициента A_k следует вычеркнуть в знаменателе дроби $P(x)/Q(x)$ скобку $(x-a_k)$ и в оставшемся выражении положить $x = a_k$.

Пример. Найти разложение дроби

$$\frac{x+1}{(x-1)x(x-2)}. \tag{7.52}$$

Согласно теореме 7.5 пишем

$$\frac{x+1}{(x-1)x(x-2)} = \frac{A_1}{x-1} + \frac{A_2}{x} + \frac{A_3}{x-2}.$$

Для отыскания A_1 вычеркиваем в выражении (7.52) скобку $(x - 1)$ и в оставшемся выражении берем $x = 1$. Получим $A_1 = -2$. Аналогично находим $A_2 = 1/2$, $A_3 = 3/2$.

Окончательно получим

$$\frac{x+1}{(x-1)x(x-2)} = \frac{-2}{x-1} + \frac{1}{2x} + \frac{3}{2(x-2)}. \qquad (7.53)$$

§ 8. Проблема интегрирования рациональной дроби

Теперь мы подготовлены к тому, чтобы в общем виде решить проблему интегрирования рациональной дроби с вещественными коэффициентами.

Прежде всего, отметим, что эта проблема сводится к проблеме интегрирования *только правильной* рациональной дроби, ибо всякую неправильную рациональную дробь можно (посредством деления числителя на знаменатель «столбиком») представить в виде суммы алгебраического многочлена неправильной рациональной дроби.

П р и м е р.

$$\frac{x^4 - x^3 + 1}{x^2 + x + 2} = (x^2 - 2x) + \frac{4x+1}{x^2+x+2},$$

ибо

$$\begin{array}{r|l} x^4 - x^3 + 1 & x^2 + x + 2 \\ \underline{-\;x^4 + x^3 + 2x^2} & x^2 - 2x \\ -2x^3 - 2x^2 + 1 & \\ \underline{-\;-2x^3 - 2x^2 - 4x} & \\ \text{остаток } 1 + 4x & \end{array}$$

Интегрировать многочлен мы умеем (напомним, что неопределенный интеграл от многочлена представляет собой некоторый многочлен степени, на единицу более высокой). Остается научиться интегрировать *правильную* рациональную дробь. В силу теоремы 7.5 проблема интегрирования правильной рациональной дроби сводится к интегрированию простейших дробей *следующих четырех типов*:

$$\text{I. } \frac{B}{x-b}, \quad \text{II. } \frac{B}{(x-b)^{\beta}}, \quad \text{III. } \frac{Mx+N}{(x^2+px+q)}, \quad \text{IV. } \frac{Mx+N}{(x^2+px+q)^{\lambda}}. \qquad (7.54)$$

Здесь $\beta = 2, 3, \ldots$; $\lambda = 2, 3, \ldots$; B, M, N, b, p и q — некоторые вещественные числа, причем трехчлен $x^2 + px + q$ не имеет вещественных корней, т. е. $q - \frac{p^2}{4} > 0$.

Докажем, что каждая из четырех указанных дробей интегрируема в элементарных функциях.

Дроби вида I и II элементарно интегрируются при помощи подстановки $t = x - b$. Мы получим

$$\int \frac{B}{x-b}\,dx = B\int \frac{dt}{t} = B\ln|t| + C = B\ln|x-b| + C, \tag{7.55}$$

$$\int \frac{B}{(x-b)^\beta}\,dx = B\int \frac{dt}{t^\beta} = -\frac{B}{(\beta-1)}\frac{1}{t^{\beta-1}} + C = \frac{-B}{(\beta-1)}\frac{1}{(x-b)^{\beta-1}} + C. \tag{7.56}$$

Для вычисления интеграла от дроби вида III представим квадратный трехчлен в виде $(x^2 + px + q) = \left(x + \frac{p}{2}\right)^2 + \left(q - \frac{p^2}{4}\right)$ и, учитывая, что $q - \frac{p^2}{4} > 0$, введем в рассмотрение вещественную постоянную $a = +\sqrt{q - \frac{p^2}{4}}$. Сделав подстановку $t = x + \frac{p}{2}$, будем иметь

$$\int \frac{(Mx+N)}{(x^2+px+q)}\,dx = \int \frac{Mt + \left(N - \frac{MP}{2}\right)}{t^2+a^2}\,dt =$$
$$= \frac{M}{2}\int \frac{2t\,dt}{t^2+a^2} + \left(N - \frac{Mp}{2}\right)\int \frac{dt}{t^2+a^2} =$$
$$= \frac{M}{2}\int \frac{d(t^2+a^2)}{t^2+a^2} + \left(N - \frac{Mp}{2}\right)\frac{1}{a}\int \frac{d\left(\frac{t}{a}\right)}{\left(\frac{t}{a}\right)^2+1} =$$
$$= \frac{M}{2}\ln(t^2+a^2) + \frac{2N-Mp}{2a}\operatorname{arctg}\frac{t}{a} + C =$$
$$= \frac{M}{2}\ln(x^2+px+q) + \frac{2N-Mp}{2\sqrt{q-\frac{p^2}{4}}}\operatorname{arctg}\frac{x+\frac{p}{2}}{\sqrt{q-\frac{p^2}{4}}} + C. \tag{7.57}$$

Остается вычислить интеграл от дроби вида IV. Используя введенные выше обозначения $t = x + \frac{p}{2}$, $a = \sqrt{q - \frac{p^2}{4}}$, получим

$$\int \frac{Mx+N}{(x^2+px+q)^\lambda}\,dx = \int \frac{Mt + \left(N - \frac{Mp}{2}\right)}{(t^2+a^2)^\lambda}\,dt =$$
$$= \frac{M}{2}\int \frac{d(t^2+a^2)}{(t^2+a^2)^\lambda} + \left(N - \frac{Mp}{2}\right)\int \frac{dt}{(t^2+a^2)^\lambda}.$$

Интересующий нас интеграл будет вычислен, если будут вычислены интегралы

$$I = \int \frac{d(t^2 + a^2)}{(t^2 + a^2)^\lambda}, \quad K_\lambda = \int \frac{dt}{(t^2 + a^2)^\lambda}.$$

Интеграл I берется элементарно:

$$I = -\frac{1}{(\lambda - 1)} \frac{1}{(t^2 + a^2)^{\lambda - 1}} + C = -\frac{1}{(\lambda - 1)} \frac{1}{(x^2 + px + q)^{\lambda - 1}} + C.$$

Интеграл K_λ вычислен нами в примере 6 в конце § 2 гл. 6. Там мы получили для этого интеграла рекуррентную формулу (6.12), позволяющую последовательно вычислить K_λ для любого $\lambda = 2, 3, \ldots$, опираясь на то, что

$$K_1 = \int \frac{dt}{t^2 + a^2} = \frac{1}{a} \operatorname{arctg} \frac{t}{a} + C.$$

Итак, нами вычислены интегралы от всех четырех простейших дробей (7.54) и доказано, что каждый из этих интегралов представляет собой *элементарную функцию*[1]. Тем самым мы приходим к следующей теореме, исчерпывающей проблему интегрирования рациональной дроби.

Теорема 7.6. *Всякая рациональная дробь интегрируется в элементарных функциях.*

В заключение этого параграфа мы остановимся на примерах вычисления неопределенных интегралов от рациональных дробей. Вычислим неопределенные интегралы от трех дробей, рассмотренных в предыдущем параграфе (7.49), (7.50) и (7.53). Пользуясь указанными тремя формулами, а также формулами (7.55), (7.56) и (7.57), будем иметь:

1. $$\int \frac{2x^3 + 4x^2 + x + 2}{(x-1)^2(x^2 + x + 1)}\, dx =$$
$$= \int \frac{2}{x-1}\, dx + \int \frac{3}{(x-1)^2}\, dx + \int \frac{dx}{x^2 + x + 1} =$$
$$= 2 \ln|x - 1| - \frac{3}{x-1} + \frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2x+1}{\sqrt{3}} + C.$$

[1] Точнее, выражается через логарифм, арктангенс и рациональную функцию.

2. $$\int \frac{3x^4+2x^3+3x^2-1}{(x-2)(x^2+1)^2}\,dx = \\ = \int \frac{3}{x-2}\,dx + \int \frac{2\,dx}{x^2+1} + \int \frac{x\,dx}{(x^2+1)^2} = \\ = 3\ln|x-2| + 2\operatorname{arctg} x + \frac{1}{2}\int \frac{d(x^2+1)}{(x^2+1)^2} = \\ = 3\ln|x-2| + 2\operatorname{arctg} x - \frac{1}{2(x^2+1)} + C.$$

3. $$\int \frac{x+1}{(x-1)x(x-2)}\,dx = \int \frac{-2}{x-1}\,dx + \int \frac{dx}{2x} + \int \frac{3}{2(x-2)}\,dx = \\ = -2\ln|x-1| + \frac{1}{2}\ln|x| + \frac{3}{2}\ln|x-2| + C.$$

§ 9. Метод Остроградского

М.В. Остроградским[1] предложен остроумный метод выделения *рациональной части* интеграла от правильной рациональной дроби $P(x)/Q(x)$.

Анализируя вид интегралов от четырех простейших дробей (7.54), можно сделать следующие выводы:

1) Интегралы от дробей вида I и III, знаменатели которых содержат двучлен или соответственно трехчлен в первой степени, *являются нерациональными функциями* (они равны логарифму или арктангенсу).

2) Интеграл от дроби вида II, знаменатель которой содержит двучлен в степени $\beta > 1$, *является правильной рациональной дробью со знаменателем, равным тому же двучлену в степени* $\beta - 1$.

3) Интеграл вида IV, подынтегральная функция которого содержит в знаменателе трехчлен в степени λ, в конечном итоге[2] *равен сумме правильной рациональной дроби со знаменателем, равным тому же трехчлену в степени* $\lambda - 1$, *и приводящегося к арктангенсу интеграла* $\text{const}\int \frac{dx}{(x^2+px+q)}$.

Выводы 1), 2), 3) позволяют заключить, чему равна рациональная часть всего интеграла от правильной дроби $P(x)/Q(x)$, которую мы, кроме того, будем считать *несократимой*. Пусть знаменатель $Q(x)$ имеет вид

$$Q(x) = (x-b_1)^{\beta_1}\ldots(x-b_m)^{\beta_m}(x^2+p_1x+q_1)^{\lambda_1}\ldots(x^2+p_nx+q_n)^{\lambda_n}. \tag{7.58}$$

[1] Михаил Васильевич Остроградский — русский математик (1801–1861).

[2] С учетом рекуррентной формулы (6.12), полученной в конце § 2 гл. 6.

Тогда рациональная часть интеграла от правильной рациональной дроби $P(x)/Q(x)$ равна сумме правильных рациональных дробей, знаменатели которых соответственно равны

$$(x-b_1)^{\beta_1-1}, \ldots, (x-b_m)^{\beta_m-1},\ (x^2+p_1x+q_1)^{\lambda_1-1}, \ldots \\ \ldots,\ (x^2+p_nx+q_n)^{\lambda_n-1}.$$

Рациональная часть интеграла от дроби $P(x)/Q(x)$ представляет собой, очевидно, правильную рациональную дробь $P_1(x)/Q_1(x)$, знаменатель которой $Q_1(x)$ имеет вид

$$Q_1(x) = (x-b_1)^{\beta_1-1} \ldots (x-b_m)^{\beta_m-1}(x^2+p_1x+q_1)^{\lambda_1-1} \ldots \\ \ldots (x^2+p_nx+q_n)^{\lambda_n-1}. \qquad (7.59)$$

Подсчитаем теперь сумму тех простейших дробей, интегралы от которых представляют собой нерациональные функции. Из выводов 1) и 3) вытекает, что эта сумма равна правильной рациональной дроби $P_2(x)/Q_2(x)$, знаменатель $Q_2(x)$ которой равен

$$Q_2(x) = (x-b_1) \ldots (x-b_m)(x^2+p_1x+q_1) \ldots (x^2+p_nx+q_n). \quad (7.60)$$

Таким образом, мы приходим к следующей формуле, впервые полученной М.В. Остроградским:

$$\int \frac{P(x)}{Q(x)}\,dx = \frac{P_1(x)}{Q_1(x)} + \int \frac{P_2(x)}{Q_2(x)}\,dx. \qquad (7.61)$$

В формуле Остроградского многочлены $Q_1(x)$ и $Q_2(x)$ определяются формулами (7.59) и (7.60) и могут быть вычислены *без разложения многочлена $Q(x)$ на произведение неприводимых множителей.*

В самом деле, в силу результатов § 4 (см. формулу (7.25)), многочлен $Q_1(x)$ представляет собой наибольший общий делитель двух многочленов $Q(x)$ и $Q'(x)$ и может быть вычислен при помощи алгоритма Евклида (см. § 4).

Многочлен $Q_2(x)$, в силу формул (7.58), (7.59) и (7.60), представляет собой частное $Q(x)/Q_1(x)$ и может быть вычислен посредством деления $Q(x)$ на $Q_1(x)$ «столбиком».

Остается вычислить многочлены $P_1(x)$ и $P_2(x)$. Поскольку дроби $P_1(x)/Q_1(x)$ и $P_2(x)/Q_2(x)$ являются правильными, многочлен $P_1(x)$ естественно задать как многочлен с неопределенными коэффициентами степени на единицу ниже, чем $Q_1(x)$, а $P_2(x)$ — как многочлен с неопределенными коэффициентами степени на единицу ниже, чем $Q_2(x)$. Для вычисления указанных неопределенных коэффициентов следует продифференцировать формулу Остроградского (7.61), привести результат дифференцирования к общему знаменателю и сопоставить коэффициенты при одинаковых степенях x в числителях.

Таким образом, метод Остроградского представляет собой остроумный прием интегрирования рациональной дроби без предварительного разложения этой дроби на сумму простейших. Этот прием особенно эффективен в том случае, когда корни $Q(x)$ в основном являются кратными или когда вызывает затруднение нахождение корней $Q(x)$.

П р и м е р. Методом Остроградского вычислить

$$\int \frac{6-7x-x^2}{x^4-2x^3+3x^2-2x+1}\,dx.$$

Имеем

$$Q(x) = x^4-2x^3+3x^2-2x+1,$$
$$Q'(x) = 4x^3-6x^2+6x-2.$$

Ищем $Q_1(x)$ как наибольший общий делитель многочленов $Q(x)$ и $Q'(x)$. Заметим, что наибольший общий делитель *именно этих* двух многочленов уже найден нами в примере, рассмотренном в конце § 4. Он равен

$$Q_1(x) = x^2-x+1.$$

Поделив $Q(x)$ на $Q_1(x)$ «столбиком», найдем

$$Q_2(x) = x^2-x+1.$$

$P_1(x)$ и $P_2(x)$ задаем как многочлены первой степени с неопределенными коэффициентами.

Формула Остроградского (7.61) принимает вид

$$\int \frac{6-7x-x^2}{x^4-2x^3+3x^2-2x+1}\,dx = \frac{Ax+B}{x^2-x+1} + \int \frac{Cx+D}{x^2-x+1}\,dx. \quad (7.62)$$

Для определения коэффициентов A, B, C, D продифференцируем формулу (7.62). Получим

$$\frac{6-7x-x^2}{x^4-2x^3+3x^2-2x+1} = \frac{A(x^2-x+1)-(Ax+B)(2x-1)}{(x^2-x+1)^2} + \frac{Cx+D}{(x^2-x+1)}.$$

Результат дифференцирования приводим к общему знаменателю, после чего сопоставляем числители. Получим

$$6-7x-x^2 = A(x^2-x+1)-(Ax+B)(2x-1)+(Cx+D)(x^2-x+1).$$

Сравнивая коэффициенты при x^0, x^1, x^2 и x^3, получим систему уравнений

$$C = 0,$$
$$-A+D-C = -1,$$
$$-2B-D+C = -7,$$
$$A+B+D = 6.$$

Решая эту систему, найдем $A = 2$, $B = 3$, $C = 0$, $D = 1$. Таким образом, формула (7.62) принимает вид

$$\int \frac{6 - 7x - x^2}{x^4 - 2x^3 + 3x^2 - 2x + 1}\,dx = \frac{2x+3}{x^2 - x + 1} + \int \frac{dx}{x^2 - x + 1}.$$

Вычислив интеграл в правой части, окончательно найдем

$$\int \frac{6 - 7x - x^2}{x^4 - 2x^3 + 3x^2 - 2x + 1}\,dx = \frac{2x+3}{x^2 - x + 1} + \frac{2}{\sqrt{3}}\operatorname{arctg}\frac{2x-1}{\sqrt{3}} + C.$$

§ 10. Интегрирование некоторых иррациональных и трансцендентных выражений

В предыдущих параграфах мы установили, что интеграл от любой рациональной дроби представляет собой элементарную функцию. В настоящем параграфе мы рассмотрим *некоторые другие классы функций, интегрируемых в элементарных функциях*. Как правило, мы будем посредством некоторой подстановки сводить интеграл от рассматриваемой функции к интегралу от рациональной дроби. Относительно указанной подстановки мы будем говорить, что она рационализирует интеграл от рассматриваемой функции.

1. Интегрирование некоторых тригонометрических выражений. Договоримся всюду в дальнейшем символом $R(x, y)$ обозначать любую рациональную функцию от двух аргументов x и y [1]).

В этом пункте мы докажем интегрируемость в элементарных функциях любой функции вида

$$R(\sin x, \cos x). \tag{7.63}$$

Докажем, что интеграл от этой функции рационализируется подстановкой $t = \operatorname{tg}\frac{x}{2}$. Действительно,

$$\sin x = \frac{2\operatorname{tg}\frac{x}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2\frac{x}{2}} = \frac{2t}{1+t^2}, \qquad \cos x = \frac{1 - \operatorname{tg}^2\frac{x}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2\frac{x}{2}} = \frac{1-t^2}{1+t^2},$$

$$x = 2\operatorname{arctg} t, \qquad dx = \frac{2\,dt}{1+t^2},$$

---

[1]) Рациональная функция от двух аргументов определяется следующим образом. Многочленом n-й степени от двух аргументов x и y называется выражение вида $P_n(x, y) = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{20}x^2 + a_{11}xy + a_{02}y^2 + \ldots + a_{0n}y^n$, где $a_{00}, a_{10}, a_{01}, \ldots, a_{0n}$ — некоторые постоянные числа. Рациональной функцией от двух аргументов называется отношение вида $P_n(x, y)/Q_m(x, y)$, где $P_n(x, y)$ — произвольный многочлен от двух аргументов степени n, а $Q_m(x, y)$ — произвольный многочлен от двух аргументов степени m.

так что

$$\int R(\sin x, \cos x)\,dx = \int R\left(\frac{2t}{1+t^2}, \frac{1-t^2}{1+t^2}\right)\frac{2\,dt}{1+t^2}.$$

Поскольку рациональная функция от рациональной функции представляет собой также рациональную функцию, то интеграл, стоящий в правой части последнего равенства, является интегралом от рациональной дроби.

Подстановка $t = \operatorname{tg}\dfrac{x}{2}$, хотя и является универсальной подстановкой, рационализирующей интеграл от функции (7.63), часто приводит к громоздким выкладкам. В связи с этим мы укажем несколько частных случаев, в которых интеграл от функции (7.63) может быть рационализирован с помощью других более простых подстановок.

Прежде всего отметим два элементарных свойства рациональной функции двух аргументов $R(u, v)$:

1°. Если рациональная функция $R(u, v)$ не меняет своего значения при изменении знака одного из аргументов (например u), т. е. если $R(-u, v) = R(u, v)$, то эта рациональная функция может быть приведена к виду $R(u, v) = R_1(u^2, v)$, где R_1 — некоторая рациональная функция своих двух аргументов. (Эта функция содержит лишь *четные* степени u.)

2°. Если же при изменении знака u функция $R(u, v)$ также меняет знак, т. е. $R(-u, v) = -R(u, v)$, то она приводится к виду $R(u, v) = R_2(u^2, v)u$. (Свойство 2° сразу вытекает из свойства 1°, если применить его к функции $R(u, v)/u$.)

Рассмотрим теперь вопрос о рационализации интеграла от функции (7.63) для некоторых частных случаев.

I. Пусть $R(u, v)$ *меняет знак при изменении знака* u. Тогда, согласно свойству 2°,

$$\int R(\sin x, \cos x)\,dx = \int R_2(\sin^2 x, \cos x)\sin x\; dx = \\ = -\int R_2(1-\cos^2 x, \cos x)d(\cos x).$$

Таким образом, интеграл от функции (7.63) рационализируется подстановкой $t = \cos x$.

II. Пусть, далее, функция $R(u, v)$ *меняет знак при изменении знака* v. Тогда, согласно тому же свойству 2°,

$$\int R(\sin x, \cos x)\,dx = \int R_3(\sin x, \cos^2 x)\cos x\; dx = \\ = \int R_3(\sin x, 1-\sin^2 x)d(\sin x),$$

т. е. интеграл от функции (7.63) рационализируется подстановкой $t = \sin x$.

III. Пусть, наконец, функция $R(u, v)$ *не меняет своего значения при одновременном изменении знаков* u *и* v, т. е.

$$R(-u, -v) = R(u, v).$$

Докажем, что в этом случае интеграл от функции (7.63) рационализируется подстановкой $t = \operatorname{tg} x$. В самом деле, в этом случае

$$R(u,v) = R\left(\frac{u}{v}v, v\right) = R_1\left(\frac{u}{v}, v\right),$$

$$R(-u,-v) = R\left(\frac{u}{v}(-v), -v\right) = R_1\left(\frac{u}{v}, -v\right).$$

Таким образом,

$$R_1\left(\frac{u}{v}, -v\right) = R_1\left(\frac{u}{v}, v\right).$$

Но тогда, согласно свойству 1°,

$$R_1\left(\frac{u}{v}, v\right) = R_2\left(\frac{u}{v}, v^2\right).$$

Окончательно получим

$$R(u,v) = R_2\left(\frac{u}{v}, v^2\right).$$

Отсюда

$$\int R(\sin x, \cos x)\,dx = \int R_2(\operatorname{tg} x, \cos^2 x)\,dx =$$
$$= \int R_2\left(\operatorname{tg} x, \frac{1}{1+\operatorname{tg}^2 x}\right) dx = \int R_2\left(t, \frac{1}{1+t^2}\right)\frac{dt}{1+t^2},$$

где $t = \operatorname{tg} x$, $x = \operatorname{arctg} t$, $dx = \dfrac{dt}{1+t^2}$.

П р и м е р ы. 1) Вычислить интеграл $I_1 = \int \dfrac{dx}{1 + a\cos x}$, где $a > 0$, $a \neq 1$. Применяя универсальную тригонометрическую подстановку $t = \operatorname{tg} x/2$, получим

$$x = 2\operatorname{arctg} t, \quad dx = \frac{2\,dt}{1+t^2}, \quad \cos x = \frac{1-t^2}{1+t^2},$$

$$I_1 = 2\int \frac{dt}{(a+1)+t^2(1-a)} = \frac{2}{a+1}\int \frac{dt}{1 + \dfrac{1-a}{1+a}t^2}.$$

Далее нужно отдельно рассмотреть два случая: 1) $0 < a < 1$, 2) $a > 1$. В случае $0 < a < 1$

$$I_1 = \frac{2}{\sqrt{1-a^2}}\operatorname{arctg}\left(t\sqrt{\frac{1-a}{1+a}}\right) + C = \frac{2}{\sqrt{1-a^2}}\operatorname{arctg}\left(\sqrt{\frac{1-a}{1+a}}\operatorname{tg}\frac{x}{2}\right) + C.$$

В случае $a > 1$

$$I_1 = \frac{1}{\sqrt{a^2-1}}\ln\left|\frac{1+t\sqrt{\dfrac{a-1}{a+1}}}{1-t\sqrt{\dfrac{a-1}{a+1}}}\right| + C = \frac{1}{\sqrt{a^2-1}}\ln\left|\frac{1+\sqrt{\dfrac{a-1}{a+1}}\operatorname{tg}\dfrac{x}{2}}{1-\sqrt{\dfrac{a-1}{a+1}}\operatorname{tg}\dfrac{x}{2}}\right| + C.$$

2) Вычислить интеграл $I_2 = \int \dfrac{\sin x\;dx}{\sin^2 x + 1}$.

Так как подынтегральная функция меняет знак при изменении знака $\sin x$, то, согласно I, следует сделать подстановку $t = \cos x$. В результате получим

$$I_2 = -\int \frac{dt}{1-t^2+1} = \int \frac{dt}{t^2-2} = \frac{-1}{2\sqrt{2}} \ln\left|\frac{t+\sqrt{2}}{t-\sqrt{2}}\right| + C = \\ = -\frac{1}{2\sqrt{2}} \ln\left|\frac{\cos x+\sqrt{2}}{\cos x-\sqrt{2}}\right| + C.$$

3) Вычислить интеграл $I_3 = \int \frac{\sin x \cos x}{\sin^4 x + \cos^4 x}\, dx$.

Так как подынтегральная функция сохраняет значение при одновременном изменении знаков $\sin x$ и $\cos x$, то, согласно III, следует сделать подстановку $t = \operatorname{tg} x$. В результате получим

$$I_3 = \int \frac{t\,dt}{t^4+1} = \frac{1}{2}\int \frac{d(t^2)}{(t^2)^2+1} = \frac{1}{2}\operatorname{arctg}(t^2) + C = \frac{1}{2}\operatorname{arctg}(\operatorname{tg}^2 x) + C.$$

2. Интегрирование дробно-линейных иррациональностей. В этом пункте мы докажем интегрируемость в элементарных функциях любой функции вида

$$R\left(x, \sqrt[n]{\frac{ax+b}{cx+d}}\right), \tag{7.64}$$

где a, b, c и d — некоторые постоянные, n — любое целое положительное число. Функцию такого вида мы будем называть *дробно-линейной иррациональностью*.

Докажем, что интеграл от функции (7.64) при $ad - bc \neq 0$ рационализируется подстановкой $t = \sqrt[n]{\frac{ax+b}{cx+d}}$. В самом деле,

$$t^n = \frac{ax+b}{cx+d}, \qquad x = \frac{dt^n - b}{a - c\cdot t^n}, \qquad dx = \frac{(ad-bc)nt^{n-1}}{(a-ct^n)^2}\,dt,$$

так что

$$\int R\left(x, \sqrt[n]{\frac{ax+b}{cx+d}}\right) dx = \int R\left(\frac{dt^n-b}{a-ct^n}, t\right) \frac{(ad-bc)nt^{n-1}}{(a-ct^n)^2}\,dt.$$

Поскольку рациональная функция от рациональной функции представляет собой также рациональную функцию, то интеграл, стоящий в правой части последнего равенства, является интегралом от рациональной дроби. Тем самым доказано, что интеграл от дробно-линейной иррациональности (7.64) рационализируется подстановкой $t = \sqrt[n]{\frac{ax+b}{cx+d}}$.

Пример. Вычислить интеграл $I = \int \sqrt{\frac{1+x}{1-x}} \frac{dx}{1-x}$. Сделав

подстановку

$$t = \sqrt{\frac{1+x}{1-x}}, \; t^2 = \frac{1+x}{1-x}, \; x = \frac{t^2-1}{t^2+1}, \; dx = \frac{4t\,dt}{(t^2+1)^2},$$

получим

$$I = 2\int \frac{t^2dt}{t^2+1} = 2\int dt - 2\int \frac{dt}{t^2+1} = 2t - 2\operatorname{arctg} t + C =$$
$$= 2\sqrt{\frac{1+x}{1-x}} - 2\operatorname{arctg}\sqrt{\frac{1+x}{1-x}} + C.$$

3. Интегрирование биномиальных дифференциалов. *Биномиальным дифференциалом* называют выражение вида

$$x^m(a+bx^n)^p\,dx,$$

где a и b — любые постоянные, а показатели степеней m, n и p — некоторые рациональные числа. Изучим вопрос об интегрируемости в элементарных функциях биномиальных дифференциалов.

Прежде всего отметим *три случая*, когда интеграл от биномиального дифференциала допускает рационализирующую подстановку.

1°. Первый случай соответствует *целому* p. Биномиальный дифференциал представляет собой дробно-линейную иррациональность вида $R\left(x, \sqrt[r]{x}\right)\,dx$, где r — наименьшее общее кратное знаменателей рациональных чисел m и n. Стало быть, интеграл от биномиального дифференциала в этом случае рационализируется подстановкой $t = \sqrt[r]{x}$.

2°. Второй случай соответствует *целому числу* $\dfrac{m+1}{n}$. Сделав подстановку $z = x^n$ и положив для краткости $\dfrac{m+1}{n} - 1 = q$, будем иметь

$$\int x^m(a+bx^n)^p\,dx = \frac{1}{n}\int (a+bz)^p z^q\,dz. \tag{7.65}$$

Подынтегральная функция в правой части (7.65) представляет собой дробно-линейную иррациональность вида $R\left(z, \sqrt[s]{a+bz}\right)$, где s — знаменатель рационального числа p.

Таким образом, во втором случае биномиальный дифференциал рационализируется подстановкой

$$t = \sqrt[s]{a+bz} = \sqrt[s]{a+bx^n}.$$

3°. Третий случай соответствует *целому числу* $\left(\dfrac{m+1}{n} + p\right)$. Подынтегральная функция в правой части (7.65) представляет собой дробно-линейную иррациональность вида $R\left(z, \sqrt[s]{\dfrac{a+bz}{z}}\right)$, так что интеграл от биномиального дифференциала рационализируется подстановкой вида

$$t = \sqrt[s]{\frac{a+bz}{z}} = \sqrt[s]{\frac{a}{x^n} + b}.$$

В середине прошлого века П.Л. Чебышев [1]) доказал, что *указанными выше тремя случаями исчерпываются все случаи, когда биномиальный дифференциал интегрируется в элементарных функциях.*

Примеры. 1) Вычислить интеграл $I = \int \frac{dx}{x^2\sqrt{a+bx^2}} = \int x^{-2}(a + bx^2)^{-1/2}\,dx$. Здесь $m = -2$, $n = 2$, $p = -1/2$, так что $\frac{m+1}{n} + p = -1$ (третий случай). Сделав подстановку

$$t = \sqrt{\frac{a}{x^2} + b}, \quad x = \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{t^2 - b}}, \quad dx = -\frac{\sqrt{a}\,t\,dt}{\sqrt{(t^2 - b)^3}},$$

будем иметь

$$I = \int \left(-\frac{dt}{a}\right) = -\frac{t}{a} + C = -\frac{\sqrt{\frac{a}{x^2} + b}}{a} + C.$$

2) Вычислить интеграл $I = \int x^5(1-x^2)^{-1/2}\,dx$. В данном случае $m = 5$, $n = 2$, $p = -\frac{1}{2}$, так что $\frac{m+1}{n} = 3$ (второй случай). Сделав подстановку

$$t = \sqrt{1 - x^2}, \quad x = \sqrt{1 - t^2}, \quad dx = -\frac{t\,dt}{\sqrt{1 - t^2}},$$

будем иметь

$$I = -\int (1 - t^2)^2 dt = -\int dt + 2\int t^2 dt - \int t^4 dt =$$
$$= -t + \frac{2}{3}t^3 - \frac{t^5}{5} + C = -\sqrt{1 - x^2} + \frac{2}{3}\sqrt{(1 - x^2)^3} - \frac{\sqrt{(1 - x^2)^5}}{5} + C.$$

4. Интегрирование квадратичных иррациональностей посредством подстановок Эйлера. В этом пункте мы докажем интегрируемость в элементарных функциях любой функции вида

$$R\left(x, \sqrt{ax^2 + bx + c}\right), \tag{7.66}$$

где a, b и c — некоторые постоянные. Функцию такого вида будем называть *квадратичной иррациональностью.* При этом мы, конечно, считаем, что квадратный трехчлен $ax^2 + bx + c$ не имеет *равных* корней (иначе корень из этого трехчлена может быть заменен рациональным выражением).

Мы докажем, что интеграл от функции (7.66) всегда рационализируется одной из так называемых *подстановок Эйлера.*

Сначала рассмотрим случай, когда квадратный трехчлен $ax^2 + bx + c$ имеет *комплексные* корни. В этом случае знак ква-

[1]) Пафнутий Львович Чебышев — великий русский математик (1821–1894).

дратного трехчлена совпадает со знаком a, и поскольку по смыслу квадратный трехчлен (из которого извлекается квадратный корень) *положителен*, то $a > 0$.

Таким образом, мы имеем право сделать следующую подстановку:

$$t = \sqrt{ax^2 + bx + c} + x\sqrt{a}. \tag{7.67}$$

Подстановку (7.67) обычно называют *первой подстановкой Эйлера.* Докажем, что эта подстановка рационализирует интеграл от функции (7.66) для рассматриваемого случая. Возвышая в квадрат обе части равенства $\sqrt{ax^2 + bx + c} = t - x\sqrt{a}$, получим $bx + c = t^2 - 2\sqrt{a}\,tx$, так что

$$x = \frac{t^2 - c}{2\sqrt{a}\,t + b}, \quad \sqrt{ax^2 + bc + x} = \frac{\sqrt{a}\,t^2 + bt + c\sqrt{a}}{2\sqrt{a}\,t + b},$$

$$dx = 2\,\frac{\sqrt{a}\,t^2 + bt + c\sqrt{a}}{(2\sqrt{a}\,t + b)^2}\,dt.$$

Таким образом,

$$\int R\left(x, \sqrt{ax^2 + bx + c}\right)dx =$$
$$= \int R\left(\frac{t^2 - c}{2\sqrt{a}\,t + b}, \frac{\sqrt{a}\,t^2 + bt + c\sqrt{a}}{2\sqrt{a}\,t + b}\right) 2\,\frac{\sqrt{a}\,t^2 + bt + c\sqrt{a}}{(2\sqrt{a}\,t + b)^2}\,dt.$$

В правой части под знаком интеграла стоит рациональная дробь.

Рассмотрим теперь случай, когда квадратный трехчлен $ax^2 + bx + c$ имеет несовпадающие *вещественные* корни x_1 и x_2.

В таком случае $ax^2 + bx + c = a(x - x_1)(x - x_2)$. Докажем, что в этом случае интеграл от функции (7.66) рационализируется посредством подстановки

$$t = \frac{\sqrt{ax^2 + bx + c}}{x - x_1}, \tag{7.68}$$

называемой обычно *второй подстановкой Эйлера.* В самом деле, возводя в квадрат равенство $\sqrt{ax^2 + bx + c} = t(x - x_1)$ и сокращая полученное равенство на $(x - x_1)$, получим $a(x - x_2) = t^2(x - x_1)$, так что

$$x = \frac{-ax_2 + x_1t^2}{t^2 - a}, \quad \sqrt{ax^2 + bx + c} = \frac{a(x_1 - x_2)}{t^2 - a}t,$$

$$dx = \frac{2a(x_1 - x_2)t}{(t^2 - a)^2}\,dt.$$

Таким образом,

$$\int R\left(x, \sqrt{ax^2+bx+c}\right)\,dx = \\ = \int R\left(\frac{-ax_2+x_1t^2}{t^2-a},\ \frac{a(x_1-x_2)t}{t^2-a}\right)\frac{2a(x_1-x_2)t}{(t^2-a)^2}\,dt.$$

В правой части под знаком интеграла стоит рациональная дробь.

Примеры. 1) Вычислить интеграл $I = \int \frac{dx}{x+\sqrt{x^2+x+1}}$. Поскольку квадратный трехчлен x^2+x+1 имеет комплексные корни, сделаем первую подстановку Эйлера

$$t = \sqrt{x^2+x+1}+x.$$

Возвышая в квадрат обе части равенства $\sqrt{x^2+x+1} = t-x$, получим $x^2+x+1 = t^2-2tx+x^2$ или $x+1 = t^2-2tx$, так что

$$x = \frac{t^2-1}{1+2t},\quad dx = 2\frac{t^2+t+1}{(1+2t)^2}\,dt.$$

Таким образом,

$$I = 2\int \frac{t^2+t+1}{t(1+2t)^2}\,dt = \int\left[\frac{A}{t}+\frac{B}{1+2t}+\frac{C}{(1+2t)^2}\right]dt.$$

Неопределенные коэффициенты A, B и C легко вычисляются: $A=2$, $B=-3$, $C=-3$. Окончательно получим

$$I = 2\ln|t| - \frac{3}{2}\ln|1+2t| + \frac{3}{2(1+2t)} + C = \\ = 2\ln\left|\sqrt{x^2+x+1}+x\right| - \frac{3}{2}\ln\left|1+2x+2\sqrt{x^2+x+1}\right| + \\ + \frac{3}{2\left(1+2x+2\sqrt{x^2+x+1}\right)} + C.$$

2) Вычислить интеграл $I = \int \frac{dx}{1+\sqrt{1-2x-x^2}}$. Поскольку квадратный трехчлен $1-2x-x^2$ имеет вещественные корни $x_1 = -1+\sqrt{2}$ и $x_2 = -1-\sqrt{2}$, сделаем вторую подстановку Эйлера (7.68)

$$t = \frac{\sqrt{1-2x-x^2}}{x+1+\sqrt{2}}.$$

Возвышая в квадрат обе части равенства $\sqrt{1-2x-x^2} = t(x+1+\sqrt{2})$, будем иметь $(-1)(x+1-\sqrt{2}) = t^2(x+1+\sqrt{2})$, так что

$$x = \frac{-t^2\left(\sqrt{2}+1\right)+\sqrt{2}-1}{t^2+1},\ \sqrt{1-2x-x^2} = \frac{2\sqrt{2}}{t^2+1}t,$$

$$1 + \sqrt{1 - 2x - x^2} = \frac{t^2 + 2\sqrt{2}\,t + 1}{t^2 + 1}, \qquad dx = -\frac{4\sqrt{2}\,t}{(t^2+1)^2}\,dt.$$

Таким образом,

$$I = -4\sqrt{2}\int \frac{t\,dt}{(t^2+1)\left(t^2 + 2\sqrt{2}\,t + 1\right)}.$$

Получаем интеграл от рациональной дроби, вычисление которого предоставляем читателю.

5. Интегрирование квадратичных иррациональностей другими способами. Хотя подстановки Эйлера всегда рационализируют интеграл от функции (7.66), но обычно эти подстановки приводят к весьма громоздким и сложным выкладкам. Ввиду этого на практике часто пользуются другими способами интегрирования функции (7.66). Этим способам и посвящен настоящий пункт.

Вводя обозначение $y = \sqrt{ax^2 + bx + c}$ и имея в виду, что y^2 представляет собой многочлен, мы можем представить функцию (7.66) в виде суммы

$$R(x, y) = R_1(x) + R_2(x)/y,$$

где $R_1(x)$ и $R_2(x)$ — некоторые рациональные функции одной переменной. Поскольку интеграл от $R_1(x)$ берется (в элементарных функциях), нам достаточно заняться вычислением интеграла от функции $R_2(x)/y$.

Мы уже знаем [1], что всякую рациональную дробь $R_2(x)$ можно представить в виде суммы многочлена $P(x)$ и *правильной* рациональной дроби $R_3(x)$. Правильную рациональную дробь $R_3(x)$ в свою очередь можно разложить на сумму простейших дробей. Имея это в виду, мы можем утверждать, что проблема интегрирования функции $R_2(x)/y$ сводится к вычислению интегралов следующих *трех типов*:

I. $\displaystyle\int \frac{P(x)}{y}\,dx$, где $P(x)$ — многочлен.

II. $\displaystyle\int \frac{B}{(x-A)^\alpha y}\,dx$, где A и B — некоторые постоянные, α — натуральное число.

III. $\displaystyle\int \frac{Mx + N}{(x^2 + px + q)^\lambda y}\,dx$, где M, N, p и q — некоторые постоянные, λ — натуральное число, причем $q - \dfrac{p^2}{4} > 0$.

Остановимся на вычислении интегралов типа I, II *и* III *в отдельности.*

I. Для вычисления *интеграла типа* I прежде всего установим рекуррентную формулу для интеграла

$$I_m = \int \frac{x^m\,dx}{y}, \text{ где } m = 0, 1, 2, \ldots$$

Для этого, предполагая, что $m \geqslant 1$, проинтегрируем следующее проверяемое посредством дифференцирования тождество:

$$(x^{m-1}y)' = ma\frac{x^m}{y} + \left(m - \frac{1}{2}\right)b\,\frac{x^{m-1}}{y} + (m-1)c\,\frac{x^{m-2}}{y}.$$

[1] См. начало § 8.

Интегрирование этого тождества приводит нас к равенству

$$x^{m-1} = maI_m + \left(m - \frac{1}{2}\right) bI_{m-1} + (m-1)cI_{m-2}. \tag{7.69}$$

Беря в равенстве (7.69) $m = 1$, найдем

$$I_1 = \frac{1}{a}y - \frac{b}{2a}I_0. \tag{7.70}$$

Полагая затем в равенстве (7.69) $m = 2$ и используя уже вычисленное значение I_1 (т. е. формулу (7.70)), найдем

$$I_2 = \frac{1}{4a^2}(2ax - 3b)y + \frac{1}{8a^2}(3b^2 - 4ac)I_0.$$

Продолжая аналогичные рассуждения далее, мы придем к следующей общей формуле:

$$I_m = P_{m-1}(x)y + c_m I_0, \tag{7.71}$$

где $P_{m-1}(x)$ — некоторый многочлен степени $m-1$, а c_m — некоторая постоянная. Если в интеграле типа I $P(x)$ представляет собой многочлен *степени n*, то интеграл типа I будет равен сумме интегралов $I_0, I_1, \ldots, I_n$ с некоторыми постоянными множителями (коэффициентами многочлена $P(x)$). Стало быть, в силу равенства (7.71) мы окончательно получим для интеграла типа I следующую формулу:

$$\int \frac{P(x)}{y}\,dx = Q_{n-1}(x)y + C_0 \int \frac{dx}{y}. \tag{7.72}$$

В этой формуле $Q_{n-1}(x)$ есть некоторый многочлен степени $n-1$, а C_0 — некоторая постоянная. Для определения многочлена $Q_{n-1}(x)$ и постоянной C_0 используется *метод неопределенных коэффициентов*. Многочлен $Q_{n-1}(x)$ записывается как многочлен с буквенными коэффициентами

$$Q_{n-1}(x) = A_0 + A_1 x + \ldots + A_{n-1}x^{n-1}.$$

Дифференцируя равенство (7.72) и умножая результат дифференцирования на y, получим

$$P(x) = Q'_{n-1}(x)(ax^2 + bx + c) + \frac{1}{2}Q_{n-1}(x)(2ax + b) + C_0. \tag{7.73}$$

В обеих частях равенства (7.73) стоят многочлены степени n. Приравнивая их коэффициенты, получим систему $n+1$ линейных уравнений, из которых определяются $A_0, A_1, \ldots, A_{n-1}$ и C_0. Разрешимость полученной системы вытекает из справедливости формулы (7.72), уже доказанной нами. Остается добавить, что интеграл, стоящий в правой части (7.72), приводится к табличному посредством линейной замены переменной $t = x + \dfrac{b}{2a}$. При помощи указанной замены интеграл $\displaystyle\int \frac{dx}{y}$ с точностью до постоянного множителя сводится к одному из следующих двух интегралов:

$$\int \frac{dt}{\sqrt{t^2 \pm k^2}} = \ln\left|t + \sqrt{t^2 \pm k^2}\right| + C \quad (k = \text{const} > 0)$$

или

$$\int \frac{dt}{\sqrt{k^2 - t^2}} = \arcsin\frac{t}{k} + C.$$

Пример. Вычислить интеграл

$$\int \frac{x^3}{\sqrt{1+2x-x^2}}\,dx.$$

Для рассматриваемого интеграла формула (7.72) имеет вид

$$\int \frac{x^3}{\sqrt{1+2x-x^2}}\,dx = (A_0 + A_1 x + A_2 x^2)\sqrt{1+2x-x^2} + C_0 \int \frac{dx}{\sqrt{1+2x-x^2}}. \tag{7.74}$$

Дифференцируя эту формулу и умножая результат дифференцирования на $\sqrt{1+2x-x^2}$, получим

$$x^3 = (A_1 + 2A_2 x)(1+2x-x^2) + (A_0 + A_1 x + A_2 x^2)(1-x) + C_0.$$

Сравнивая коэффициенты при x^3, x^2, x^1, x^0 в правой и левой частях, получим систему уравнений

$$\begin{aligned} -3A_2 &= 1,\\ 5A_2 - 2A_1 &= 0,\\ 2A_2 + 3A_1 - A_0 &= 0,\\ A_1 + A_0 + C_0 &= 0. \end{aligned}$$

Решая эту систему, найдем $A_2 = -1/3$, $A_1 = -5/6$, $A_0 = -19/6$, $C_0 = 4$. Интеграл, стоящий в правой части (7.74), вычисляем посредством замены $t = x - 1$. Получим

$$\int \frac{dx}{\sqrt{1+2x-x^2}} = \int \frac{dt}{\sqrt{2-t^2}} = \arcsin\frac{t}{\sqrt{2}} + C = \arcsin\frac{x-1}{\sqrt{2}} + C.$$

Окончательно будем иметь

$$\int \frac{x^3}{\sqrt{1+2x-x^2}}\,dx = \left(-\frac{19}{6} - \frac{5}{6}x - \frac{1}{3}x^2\right)\sqrt{1+2x-x^2} + 4\arcsin\frac{x-1}{\sqrt{2}} + C.$$

II. Переходим к вычислению *интеграла типа* II. Покажем, что этот интеграл сводится к интегралу типа I посредством замены $t = \dfrac{1}{x-A}$. В самом деле, поскольку

$$dx = -\frac{dt}{t^2},\quad ax^2 + bx + c = \frac{(A^2 a + Ab + c)t^2 + (2aA + b)t + a}{t^2},$$

мы получим

$$\int \frac{B}{(x-A)^\alpha y}\,dx = -\int \frac{Bt^{\alpha-1}dt}{\sqrt{(A^2 a + Ab + c)t^2 + (2aA + b)t + a}}.$$

III. Займемся, наконец, вычислением *интеграла типа* III. Прежде всего вычислим интеграл типа III *для частного случая* $p = 0$, $b = 0$, т. е. вычислим интеграл

$$K = \int \frac{Mx + N}{(x^2+q)^\lambda \sqrt{ax^2+c}}\,dx.$$

Этот интеграл распадается на сумму двух интегралов

$$K_1 = M\int \frac{x\,dx}{(x^2+q)^\lambda\sqrt{ax^2+c}} \quad \text{и} \quad K_2 = N\int \frac{dx}{(x^2+q)^\lambda\sqrt{ax^2+c}}.$$

Первый из этих интегралов может быть записан в виде

$$K_1 = \frac{M}{2}\int \frac{d(x^2)}{(x^2+q)^\lambda\sqrt{ax^2+c}},$$

из чего видно, что подынтегральная функция представляет собой *линейную* (а не квадратичную) иррациональность относительно x^2. В силу доказанного в п. 2 интеграл K_1 рационализируется подстановкой $t = \sqrt{ax^2+c}$. Интеграл K_2 может быть записан в виде [1])

$$K_2 = N\int \frac{x^{\frac{1}{2\lambda-2}}\frac{dx}{x^3}}{\left(1+q\frac{1}{x^2}\right)^\lambda\sqrt{a+c\frac{1}{x^2}}} = -\frac{N}{2}\int \frac{\left(\frac{1}{x^2}\right)^{\lambda-1}d\left(\frac{1}{x^2}\right)}{\left[1+q\left(\frac{1}{x^2}\right)\right]^\lambda\sqrt{a+c\left(\frac{1}{x^2}\right)}},$$

из чего видно, что подынтегральная функция представляет собой *линейную* иррациональность относительно $1/x^2$. Стало быть, интеграл K_2 рационализируется подстановкой $r = \sqrt{a+\dfrac{c}{x^2}}$. Итак, для частного случая, когда у обоих квадратных трехчленов *отсутствуют члены первой степени*, интеграл типа III нами рационализирован.

Рассмотрим теперь интеграл типа III *в общем случае* и покажем, что его можно свести к интегралу изученного выше частного вида. Если коэффициенты квадратных трехчленов удовлетворяют соотношению

$$b = ap, \tag{7.75}$$

то для сведения интеграла типа III к интегралу изученного выше частного вида достаточно сделать замену $x = t - \dfrac{p}{2}$. В самом деле, при этом мы получим

$$\int \frac{(Mx+N)\,dx}{(x^2+px+q)^\lambda\sqrt{ax^2+bx+c}} = \int \frac{Mt+\left(\dfrac{Mp}{2}+N\right)}{\left[t^2+\left(q-\dfrac{p^2}{4}\right)\right]^\lambda\sqrt{at^2+\left(c-\dfrac{ap^2}{4}\right)}}\,dt.$$

Сложнее осуществляется сведение интеграла типа III к интегралу изученного выше частного вида для случая, когда коэффициенты квадратных трехчленов *не удовлетворяют* соотношению (7.75). В этом случае мы сначала сделаем дробно-линейную подстановку

$$x = \frac{\mu t+\nu}{1+t}, \tag{7.76}$$

выбрав постоянные μ и ν так, чтобы в полученных квадратных трехчленах *отсутствовали члены первой степени относительно* t. Покажем, что такие μ и ν выбрать можно. В самом деле, сделав замену (7.76), будем иметь

$$x^2+px+q = \frac{(\mu^2+p\mu+q)t^2+[2\mu\nu+p(\mu+\nu)+2q]t+(\nu^2+p\nu+q)}{(1+t)^2},$$

$$ax^2+bx+c = \frac{(a\mu^2+b\mu+c)t^2+[2\mu\nu a+b(\mu+\nu)+2c]t+(a\nu^2+b\nu+c)}{(1+t)^2}.$$

---

[1]) Мы считаем, что $x \neq 0$.

Таким образом, коэффициенты μ и ν определятся из системы уравнений

$$2\mu\nu + p(\mu+\nu) + 2q = 0, \quad 2\mu\nu a + b(\mu+\nu) + 2c = 0$$

или из системы эквивалентных уравнений

$$\mu + \nu = -\frac{2(c-aq)}{b-ap}, \quad \mu\cdot\nu = \frac{cp-bq}{b-ap}.$$

Стало быть, μ и ν являются корнями квадратного уравнения

$$z^2 + \frac{2(c-aq)}{b-ap}z + \frac{cp-bq}{b-ap} = 0. \tag{7.77}$$

Остается доказать, что квадратное уравнение (7.77) имеет вещественные и различные корни. Для этого достаточно доказать, что дискриминант этого уравнения положителен, т. е. достаточно установить неравенство

$$(c-aq)^2 > (cp-bq)(b-ap). \tag{7.78}$$

Легко убедиться в том, что неравенство (7.78) эквивалентно следующему неравенству:

$$[2(c+aq)-bp]^2 > (4q-p^2)(4ac-b^2). \tag{7.79}$$

Поскольку квадратный трехчлен (x^2+px+q) имеет комплексные корни, то $4q-p^2>0$.

Неравенство (7.79) заведомо имеет место, если $4ac-b^2<0$. Докажем, что это неравенство справедливо и в случае, когда $4ac-b^2>0$. В этом случае $q>0$, $ac>0$ и $4\sqrt{acq}>pb$. Поэтому, учитывая, что $\dfrac{c+aq}{2} \geqslant \sqrt{caq}$, будем иметь

$$[2(c+aq)-bp]^2 \geqslant [4\sqrt{qac}-pb]^2 = \\ = (4q-p^2)(4ac-b^2) + 4\left(p\sqrt{ac}-b\sqrt{q}\right)^2 \geqslant (4q-p^2)(4ac-b^2).$$

В написанной цепочке неравенств имеется хотя бы один знак строгого неравенства $>$, ибо первый знак $\geqslant$ обращается в знак $=$ лишь при $c=aq$, но при $c=aq$, в силу того, что $b\neq ap$, заведомо $\left(p\sqrt{ac}-b\sqrt{q}\right)\neq 0$, и поэтому второй знак $\geqslant$ не обращается в знак $=$. Итак, нами доказано неравенство (7.79), т. е. доказана возможность выбора таких μ и ν, при которых в полученных квадратных трехчленах отсутствуют члены первой степени относительно t. Сделав замену (7.76) с указанными μ и ν, мы приведем интеграл типа III к виду

$$\int \frac{P(t)\,dt}{(t^2+q_1)^\lambda\sqrt{a_1t^2+c_1}}, \tag{7.80}$$

где a_1, c_1 и q_1 — некоторые постоянные, а $P(t)$ — многочлен степени $2\lambda - 1$. Разложив [1] дробь $\dfrac{P(t)}{(t^2+q_1)^\lambda}$ на сумму простейших, мы сведем вопрос о вычислении интеграла (7.80) к вычислению суммы интегралов вида

$$\int \frac{M_kt+N_k}{(t^2+q_1)^k\sqrt{a_1t^2+c_1}}\,dt \qquad (k=1,2,\ldots,\lambda).$$

[1] При $\lambda>1$.

Каждый из этих интегралов относится к изученному выше частному виду. Тем самым мы доказали интегрируемость (в элементарных функциях) интегралов всех трех типов I, II и III. Таким образом, еще раз помимо подстановок Эйлера доказана интегрируемость функции (7.66) в элементарных функциях.

Пример. Вычислить интеграл $I = \int \frac{dx}{(x^2 - x + 1)\sqrt{x^2 + x + 1}}$. Этот интеграл относится к типу III. Поскольку для него нарушено соотношение (7.75), мы должны прежде всего сделать замену (7.76). В результате этой замены получим

$$x^2 + x + 1 = \frac{(\mu^2 + \mu + 1)t^2 + [2\mu\nu + (\mu + \nu) + 2]t + (\nu^2 + \nu + 1)}{(1 + t)^2},$$

$$x^2 - x + 1 = \frac{(\mu^2 - \mu + 1)t^2 + [2\mu\nu - (\mu + \nu) + 2]t + (\nu^2 - \nu + 1)}{(1 + t)^2}.$$

Постоянные μ и ν находим из системы уравнений

$$2\mu\nu + (\mu + \nu) + 2 = 0, \quad 2\mu\nu - (\mu + \nu) + 2 = 0.$$

Легко убедиться в том, что [1] $\mu = 1$, $\nu = -1$. Таким образом, замена (7.76) имеет вид $x = \frac{t - 1}{t + 1}$, так что

$$t = \frac{x + 1}{1 - x}, \quad dx = \frac{2dt}{(1 + t)^2}, \quad x^2 + x + 1 = \frac{3t^2 + 1}{(1 + t)^2}, \quad x^2 - x + 1 = \frac{t^2 + 3}{(1 + t)^2}.$$

Рассматриваемый интеграл принимает вид

$$I = 2\int \frac{(1 + t)\,dt}{(t^2 + 3)\sqrt{3t^2 + 1}} + I_1 + I_2,$$

где

$$I_1 = 2\int \frac{t\,dt}{(t^2 + 3)\sqrt{3t^2 + 1}}, \quad I_2 = 2\int \frac{dt}{(t^2 + 3)\sqrt{3t^2 + 1}}.$$

Для вычисления интеграла I_1 делаем подстановку $u = \sqrt{3t^2 + 1}$, а для вычисления интеграла I_2 делаем подстановку $v = \sqrt{3 + \frac{1}{t^2}}$. В результате получим

$$I_1 = 2\int \frac{du}{u^2 + 8} = \frac{1}{\sqrt{2}}\operatorname{arctg}\frac{u}{\sqrt{8}} + C = \frac{1}{\sqrt{2}}\operatorname{arctg}\sqrt{\frac{x^2 + x + 1}{2(1 - x)^2}} + C,$$

$$I_2 = -2\int \frac{dv}{3v^2 - 8} =$$

$$= \frac{1}{2\sqrt{6}}\ln\left|\frac{v + \sqrt{\frac{8}{3}}}{v - \sqrt{\frac{8}{3}}}\right| + C = \frac{1}{2\sqrt{6}}\ln\left|\frac{\sqrt{\frac{x^2 + x + 1}{(x + 1)^2}} + \sqrt{\frac{8}{3}}}{\sqrt{\frac{x^2 + x + 1}{(x + 1)^2}} - \sqrt{\frac{8}{3}}}\right| + C.$$

[1] Можно было бы положить наоборот: $\mu = -1$, $\nu = 1$.

§ 11. Эллиптические интегралы

К интегралам от квадратичных иррациональностей естественно примыкают следующие интегралы:

$$\int R\left(x, \sqrt{ax^3 + bx^2 + cx + d}\right) dx, \tag{7.81}$$

$$\int R\left(x, \sqrt{ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e}\right) dx, \tag{7.82}$$

подынтегральные функции которых содержат корень квадратный из многочленов третьей или четвертой степени.

Эти интегралы весьма часто встречаются в приложениях. Отметим сразу же, что интегралы (7.81) и (7.82), *вообще говоря, не являются элементарными функциями.*

Оба эти интеграла принято называть *эллиптическими* в тех случаях, когда они не выражаются через элементарные функции, и *псевдоэллиптическими* в тех случаях, когда они выражаются через элементарные функции [1].

Ввиду важности для приложений интегралов (7.81) и (7.82) возникла необходимость составления таблиц и графиков функций, определяемых этими интегралами. При произвольных коэффициентах a, b, c, d и e такие таблицы и графики составить очень трудно. Поэтому возникла задача о сведении всех интегралов вида (7.81) и (7.82) к нескольким типам интегралов, содержащих по возможности меньше произвольных коэффициентов (или, как говорят, о приведении интегралов (7.81) и (7.82) к *канонической форме*).

Прежде всего, заметим, что интеграл (7.81) сводится к интегралу (7.82). В самом деле, кубичный трехчлен заведомо имеет хотя бы один вещественный корень x_0, а поэтому его можно представить в виде $ax^3 + bx^2 + cx + d = a(x - x_0)(x^2 + px + q)$.

Сделав подстановку $x - x_0 = \pm t^2$, мы, как легко видеть, преобразуем интеграл (7.81) в (7.82).

Таким образом, нам достаточно рассмотреть лишь интеграл (7.82).

В силу результатов § 6 многочлен четвертой степени можно разложить на произведение двух квадратных трехчленов с вещественными коэффициентами

$$ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e = a(x^2 + px + q)(x^2 + p'x + q').$$

Всегда найдется некоторая линейная или дробно-линейная подстановка, уничтожающая у обоих квадратных трехчленов линейные члены [2]. Сделав такую подстановку, мы с точностью до слагаемого, представляющего собой элементарную функцию, преобразуем интеграл (7.82) к виду

$$\int \frac{R(t^2)\,dt}{\sqrt{A(1 + mt^2)(1 + m't^2)}}, \tag{7.83}$$

где R — некоторая рациональная функция. Далее можно показать, что при любых комбинациях абсолютных значений и знаков постоянных A, m и m' найдется замена, сводящая интеграл (7.83) к так называемому *каноническому интегралу*

$$\int \frac{R_1(z^2)\,dz}{\sqrt{(1 - z^2)(1 - k^2z^2)}}, \tag{7.84}$$

---

[1]) Названия происходят оттого, что впервые с этими интегралами встретились при решении задачи о спрямлении эллипса (см. пример 3 п. 6 § 1 гл. 11).

[2]) Это доказывается точно так же, как в п. 5 § 10.

в котором через k обозначена постоянная, удовлетворяющая условию $0 < k < 1$.

Любой канонический интеграл (7.84) с точностью до слагаемого, представляющего собой элементарную функцию, может быть приведен к следующим трем стандартным интегралам:

$$\begin{gathered}\int \frac{dz}{\sqrt{(1-z^2)(1-k^2z^2)}}, \int \frac{z^2dz}{\sqrt{(1-z^2)(1-k^2z^2)}},\\ \int \frac{dz}{(1+hz^2)\sqrt{(1-z^2)(1-k^2z^2)}} \quad (0<k<1).\end{gathered} \tag{7.85}$$

Интегралы (7.85) принято называть *эллиптическими интегралами* соответственно *1-го, 2-го и 3-го рода.* Каждый из этих интегралов, как показано Лиувиллем [1]), представляет собой *неэлементарную функцию.* Эллиптические интегралы 1-го и 2-го рода содержат только один параметр k, принимающий вещественные значения из интервала $0 < k < 1$, а эллиптический интеграл 3-го рода, кроме того, содержит параметр h, который может принимать и комплексные значения.

Лежандр [2]) подверг интегралы (7.85) дальнейшему упрощению, сделав замену $z = \sin\varphi$ $(0 \leqslant \varphi \leqslant \pi/2)$.

С помощью этой замены первый из интегралов (7.85) преобразуется к виду

$$\int \frac{d\varphi}{\sqrt{1-k^2\sin^2\varphi}}. \tag{7.86}$$

Второй из интегралов (7.85) при этой замене с точностью до постоянного множителя оказывается равным разности интеграла (7.86) и следующего интеграла:

$$\int \sqrt{1-k^2\sin^2\varphi}\,d\varphi. \tag{7.87}$$

Третий из интегралов (7.85) преобразуется к виду

$$\int \frac{d\varphi}{(1+h\sin^2\varphi)\sqrt{1-k^2\sin\varphi}}. \tag{7.88}$$

Интегралы (7.86), (7.87) и (7.88) принято называть *эллиптическими интегралами* соответственно *1-го, 2-го и 3-го рода в форме Лежандра.*

Особенно важную роль в приложениях играют интегралы (7.86) и (7.87). Если считать, что оба эти интеграла обращаются в нуль при $\varphi = 0$, то получатся две вполне определенные функции, которые обычно обозначают символами $F(k,\varphi)$ и $E(k,\varphi)$. Лежандром и другими математиками изучены их свойства. Для них установлен ряд формул, составлены обширные таблицы и графики.

Наряду с элементарными функциями функции E и F прочно вошли в семейство функций, часто используемых в анализе. Здесь еще раз стоит отметить условность понятия элементарной функции. Вместе с тем следует подчеркнуть, что задачи интегрального исчисления вовсе не ограничиваются изучением функций, интегрируемых в элементарных функциях.

---

[1]) Жозеф Лиувилль — французский математик (1809–1882).

[2]) Адриан Мари Лежандр — французский математик (1752–1833).

ГЛАВА 8

ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕМЫ О НЕПРЕРЫВНЫХ И ДИФФЕРЕНЦИРУЕМЫХ ФУНКЦИЯХ

Понятия непрерывной функции и дифференцируемой функции уже известны нам из глав 4 и 5. В настоящей главе будет установлен ряд важных свойств произвольных непрерывных и дифференцируемых функций. Для вывода этих свойств мы введем новое определение предельного значения функции и докажем эквивалентность этого определения старому определению, данному в гл. 4.

§ 1. Новое определение предельного значения функции

1. Новое определение предельного значения функции. Его эквивалентность старому определению. Пусть, как и в § 2 гл. 4, функция $y = f(x)$ определена на некотором множестве $\{x\}$, и пусть a — некоторая точка, быть может, и не принадлежащая множеству $\{x\}$, но обладающая тем свойством, что в любой ε-окрестности точки a имеются точки множества $\{x\}$.

Напомним *старое определение* предельного значения функции, введенное в гл. 4: *число b называется предельным значением функции $f(x)$ в точке $x = a$, если для любой сходящейся к a последовательности $x_1, x_2, \ldots, x_n, \ldots$ значений аргумента x, элементы которой отличны от a, соответствующая последовательность $f(x_1), f(x_2), \ldots, f(x_n), \ldots$ значений функции сходится к b.*

Сформулируем теперь ***новое определение предельного значения функции.*** *Число b называется предельным значением функции $f(x)$ в точке $x = a$, если для любого положительного числа ε найдется положительное число δ* [1] *такое, что для всех значений аргумента x, удовлетворяющих нера-*

---

[1]) Так как δ зависит от ε, то иногда пишут $\delta = \delta(\varepsilon)$.

венству $0 < |x-a| < \delta$, *справедливо неравенство* $|f(x) - b| < \varepsilon$ [1]).

Замечание 1. Ограничение $0 < |x-a|$ означает, что рассматриваются значения аргумента x, *отличные от* a. Это ограничение становится понятным, если вспомнить, что изучаемая функция $f(x)$ *может быть не определена в точке* a. Отсутствие этого ограничения сделало бы невозможным определение производной $f'(a)$ как предельного значения функции $F(x) = \dfrac{f(x)-f(a)}{x-a}$ в точке a.

Замечание 2. С логической точки зрения главным в новом определении является то, что *для каждого* $\varepsilon > 0$ *найдется отвечающее этому* ε *положительное число* δ, гарантирующее справедливость неравенства $|f(x) - b| < \varepsilon$ для всех значений аргумента x, удовлетворяющих неравенству

$$0 < |x-a| < \delta.$$

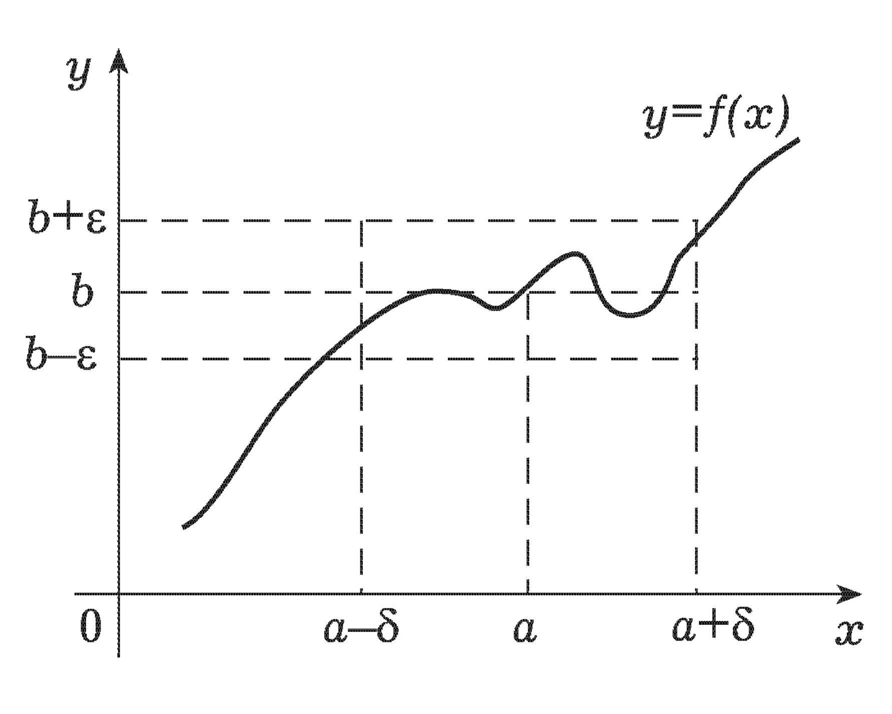


Рис. 8.1

Замечание 3. Привлекая идею приближения функции $f(x)$ в окрестности точки $x = a$ с наперед заданной точностью ε, мы можем следующим образом переформулировать новое определение предельного значения функции: *число* b *называется предельным значением функции* $f(x)$ *в точке* a, *если для любой наперед заданной точности* ε *можно указать такую* δ*-окрестность точки* a, *что для всех значений аргумента* x, *отличных от* a *и принадлежащих указанной* δ*-окрестности, число* b *приближает значение функции* $f(x)$ *с точностью* ε (рис. 8.1).

Теорема 8.1. *Старое и новое определения предельного значения функции эквивалентны.*

Доказательство. 1) Пусть сначала число b является предельным значением $f(x)$ в точке a *по новому определению*. Докажем, что это же число b является предельным значением $f(x)$ в точке a и *по старому определению*. Пусть $\{x_n\}$ — любая сходящаяся к числу a последовательность значений аргумента, все элементы которой отличны от a. Требуется доказать, что соответствующая последовательность $\{f(x_n)\}$ значений функции сходится к числу b. Фиксируем *любое* $\varepsilon > 0$. Согласно новому

[1]) Старое определение предельного значения функции называют также определением предельного значения по Гейне, а новое определение — определением предельного значения по Коши.

определению предельного значения функции, для этого ε найдется $\delta > 0$ такое, что $|f(x) - b| < \varepsilon$ для всех значений аргумента x, для которых $0 < |x - a| < \delta$. Так как последовательность $\{x_n\}$ сходится к числу a, то для указанного числа $\delta > 0$ найдется номер N такой, что $0 < |x_n - a| < \delta$ при $n \geqslant N$. Стало быть, $|f(x_n) - b| < \varepsilon$ при $n \geqslant N$, а это и означает сходимость последовательности $\{f(x_n)\}$ к числу b.

2) Пусть теперь число b является предельным значением $f(x)$ в точке a *по старому определению*. Докажем, что это же число b является предельным значением $f(x)$ в точке a и *по новому определению*. Предположим, что это не так. Тогда для *некоторого* положительного числа ε *не найдется* гарантирующего положительного числа δ, указанного в новом определении, т. е. для этого ε и *для сколь угодно малого положительного* δ найдется хотя бы одно значение аргумента x такое, что $0 < |x - a| < \delta$, но $|f(x) - b| \geqslant \varepsilon$.

В силу сказанного мы можем взять последовательность $\delta_n = 1/n$ $(n = 1, 2, 3, \ldots)$ и утверждать, что для каждого ее элемента $\delta_n = 1/n$ найдется хотя бы одно значение аргумента x_n такое, что

$$0 < |x_n - a| < \frac{1}{n}, \quad \text{но} \quad |f(x_n) - b| \geqslant \varepsilon. \tag{8.1}$$

Левое из неравенств (8.1) означает, что последовательность $\{x_n\}$ сходится к числу a и состоит из элементов, отличных от a. Но тогда, согласно старому определению предельного значения функции, соответствующая последовательность $\{f(x_n)\}$ значений функции сходится к числу b, а этому противоречит правое из неравенств (8.1), справедливое для всех номеров n. Полученное противоречие доказывает теорему.

Новое определение предельного значения функции позволяет нам сформулировать ***новое определение непрерывности функции в точке $x = a$***[1]. *Функция $f(x)$ называется непрерывной в точке $x = a$, если для любого положительного числа ε найдется положительное число δ такое, что для всех значений аргумента x, удовлетворяющих неравенству $|x - a| < \delta$ справедливо неравенство*

$$|f(x) - f(a)| < \varepsilon. \tag{8.2}$$

З а м е ч а н и е 4. В этом определении нет необходимости накладывать ограничение $0 < |x - a|$, ибо при $x = a$ левая часть неравенства (8.2) обращается в нуль и неравенство (8.2) заведомо справедливо.

---

[1]) Конечно, при этом предполагается, что функция $y = f(x)$ определена и в самой точке a.

По аналогии с вышеизложенным формулируется новое определение предельного значения функции и доказывается эквивалентность этого определения старому определению и *для случая, когда одно или оба числа a и b обращаются в $+\infty$ или $-\infty$.* Ограничимся тем, что сформулируем новое определение предельного значения функции для случая, когда $a = +\infty$: *число b называется предельным значением $f(x)$ при $x \to +\infty$, если для любого положительного числа ε найдется положительное число A такое, что для всех значений аргумента x, удовлетворяющих неравенству $x > A$, справедливо неравенство $|f(x) - b| < \varepsilon$.*

Рисунок 8.2 разъясняет указанное определение.

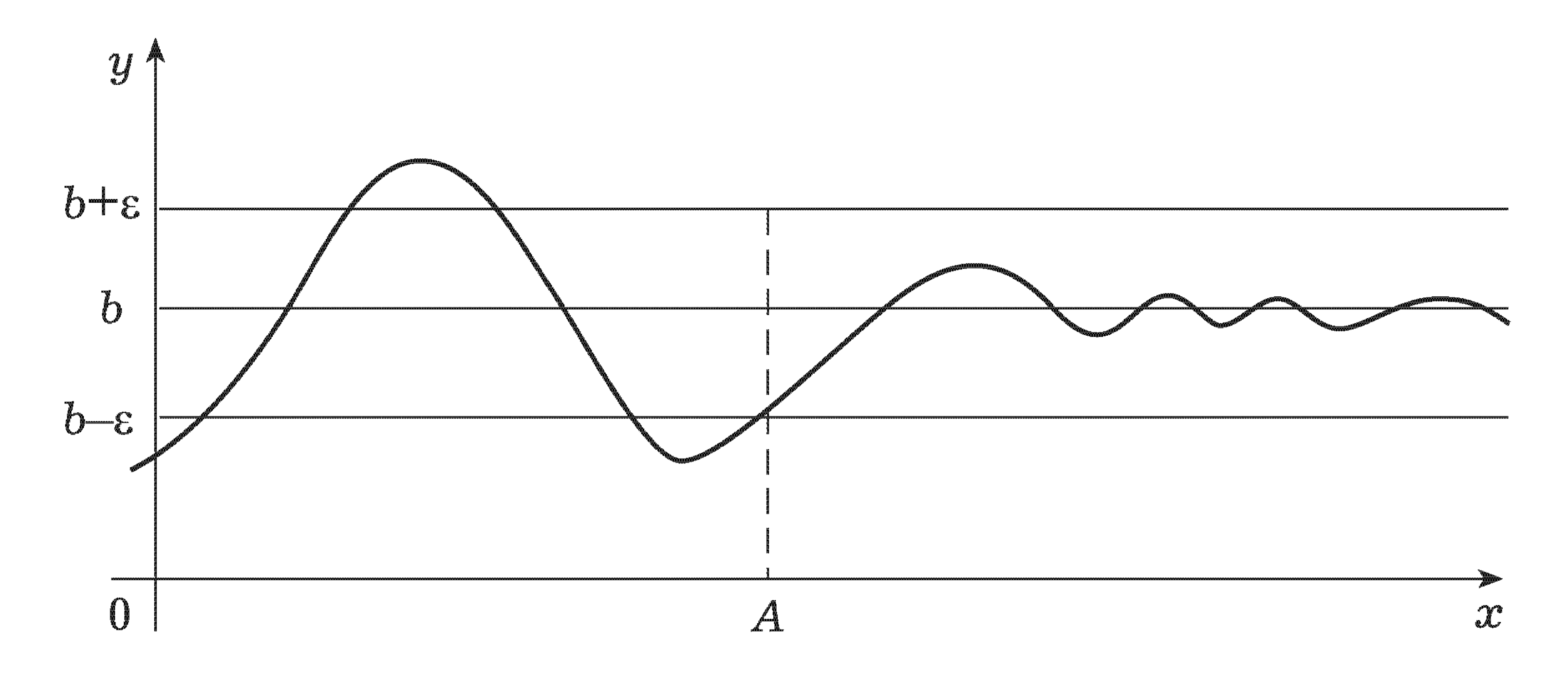


Рис. 8.2

В заключение сформулируем новое определение *правого* и *левого* предельных значений функции $f(x)$ в точке a: *число b называется правым (левым) предельным значением функции $f(x)$ в точке a, если для любого положительного числа ε найдется положительное число δ такое, что для всех значений аргумента x, удовлетворяющих неравенству $0 < x - a < \delta$ $(0 < a - x < \delta)$, справедливо неравенство $|f(x) - b| < \varepsilon$.*

Доказательство эквивалентности этого определения старому определению правого (левого) предельного значения совершенно аналогично доказательству теоремы 8.1.

2. Необходимое и достаточное условие существования предельного значения функции (критерий Коши). Пользуясь эквивалентностью старого и нового определений предельного значения функции, установим необходимое и достаточное условие существования у функции $f(x)$ предельного значения в точке a.

Определение. *Будем говорить, что функция $f(x)$ удовлетворяет в точке $x = a$ условию Коши, если для любого положительного числа ε найдется положительное число δ такое, что, каковы бы ни были два значения аргумента x' и x'', удов-*

летворяющие неравенствам $0 < |x' - a| < \delta$, $0 < |x'' - a| < \delta$, *для соответствующих значений функции справедливо неравенство*

$$|f(x') - f(x'')| < \varepsilon.$$

Теорема 8.2 (критерий Коши). *Для того чтобы функция $f(x)$ имела конечное предельное значение в точке $x = a$, необходимо и достаточно, чтобы функция $f(x)$ удовлетворяла в этой точке условию Коши.*

Доказательство. 1) Необходимость. Пусть существует конечное предельное значение $\lim\limits_{x \to a} f(x) = b$. Докажем, что функция $f(x)$ удовлетворяет в точке $x = a$ условию Коши. Возьмем произвольное $\varepsilon > 0$. Согласно новому определению предельного значения функции для положительного числа $\varepsilon/2$ найдется положительное число δ такое, что, каковы бы ни были значения аргумента x' и x'', удовлетворяющие неравенствам $0 < |x' - a| < \delta$, $0 < |x'' - a| < \delta$, для соответствующих значений функции справедливы неравенства $|f(x') - b| < \varepsilon/2$, $|f(x'') - b| < \varepsilon/2$. Так как модуль суммы двух величин не превосходит суммы их модулей, то из последних неравенств получим

$$|f(x') - f(x'')| = |[f(x') - b] - [f(x'') - b]| \leqslant \\ \leqslant |f(x') - b| + |f(x'') - b| < \varepsilon.$$

Тем самым доказано, что функция $f(x)$ удовлетворяет в точке $x = a$ условию Коши.

2) Достаточность. Пусть функция $f(x)$ удовлетворяет в точке $x = a$ условию Коши. Докажем, что функция $f(x)$ имеет предельное значение в точке $x = a$. Пусть $\{x_n\}$ — любая сходящаяся к a последовательность значений аргумента, все элементы x_n которой отличны от a. В силу старого определения предельного значения функции достаточно доказать, что соответствующая последовательность $\{f(x_n)\}$ значений функции сходится к некоторому числу b, причем это число b *одно и то же* для всех сходящихся к a последовательностей $\{x_n\}$ таких, что $x_n \neq a$.

Докажем сначала *сходимость* любой последовательности $\{f(x_n)\}$. Пусть задано *произвольное* $\varepsilon > 0$. Возьмем то положительное число δ, которое соответствует этому ε согласно условию Коши, и, пользуясь сходимостью последовательности $\{x_n\}$ к a, выберем для этого δ номер N такой, что

$$0 < |x_n - a| < \delta \quad \text{при} \quad n \geqslant N.$$

При этом для любого натурального p ($p = 1, 2, \ldots$) и подавно

$$0 < |x_{n+p} - a| < \delta \quad \text{при} \quad n \geqslant N.$$

Последние два неравенства в силу условия Коши приводят к неравенству $|f(x_{n+p}) - f(x_n)| < \varepsilon$ при $n \geqslant N$, т. е. доказывают

фундаментальность последовательности $\{f(x_n)\}$. В силу критерия Коши для последовательности (т. е. теоремы 3.19) последовательность $\{f(x_n)\}$ сходится к некоторому числу b.

Докажем теперь, что все последовательности $\{f(x_n)\}$, соответствующие всевозможным сходящимся к a последовательностям $\{x_n\}$, *имеют один и тот же предел* b.

Пусть $\{x_n\}$ и $\{x'_n\}$ — *любые* две сходящиеся к a последовательности значений аргумента, все элементы которых отличны от a. В силу доказанного выше обе последовательности $\{f(x_n)\}$ и $\{f(x'_n)\}$ сходятся. Обозначим предел первой из этих последовательностей через b, а второй — через b'. Докажем, что $b = b'$. Рассмотрим сходящуюся к a последовательность

$$x_1, x'_1, x_2, x'_2, \ldots, x_n, x'_n, \ldots$$

В силу доказанного выше соответствующая последовательность значений функции

$$f(x_1), f(x'_1), f(x_2), f(x'_2), \ldots, f(x_n), f(x'_n), \ldots$$

является сходящейся. Но тогда в силу п. 1 § 4 гл. 3 *все подпоследовательности этой последовательности*, в том числе $\{f(x_n)\}$ и $\{f(x'_n)\}$, *сходятся к одному и тому же пределу*, т. е. $b = b'$. Теорема 8.2 доказана.

Аналогично формулируется условие Коши и устанавливается необходимое и достаточное условие существования предельного значения функции $f(x)$ при $x \to +\infty$ и при $x \to -\infty$. Ограничимся формулировками для случая $x \to +\infty$.

Будем говорить, что функция $f(x)$ удовлетворяет при $x \to +\infty$ условию Коши, если для любого положительного числа ε найдется положительное число A такое, что для любых двух значений аргумента x' и x'', превосходящих A, справедливо неравенство $|f(x') - f(x'')| < \varepsilon$.

В полной аналогии с теоремой 8.2 доказывается следующее утверждение: *для того чтобы функция $f(x)$ имела конечное предельное значение при $x \to +\infty$, необходимо и достаточно, чтобы она удовлетворяла при $x \to +\infty$ условию Коши.*

§ 2. Локальная ограниченность функции, имеющей предельное значение

В полном соответствии с определением множества вещественных чисел, ограниченного сверху (снизу)[1], введем понятие *функции, ограниченной на данном множестве сверху (снизу).*

Определение 1. *Функция $f(x)$ называется ограниченной сверху (снизу) на множестве $\{x\}$, если найдется*

[1] См. п. 5 § 1 гл. 2.

такое вещественное число M (число m), что для всех значений аргумента x из множества $\{x\}$ справедливо неравенство $f(x) \leqslant M$ ($f(x) \geqslant m$).

При этом число M (число m) называется верхней (нижней) гранью функции $f(x)$ на множестве $\{x\}$.

Определение 2. *Функция $f(x)$ называется ограниченной с обеих сторон или просто о г р а н и ч е н н о й на множестве $\{x\}$, если она ограничена на этом множестве и сверху, и снизу, т. е. если найдутся такие вещественные числа m и M, что для всех значений аргумента x из множества $\{x\}$ справедливы неравенства $m \leqslant f(x) \leqslant M$.*

Таким образом, ограниченность функции $f(x)$ на множестве $\{x\}$ фактически означает ограниченность множества всех значений этой функции.

П р и м е р ы. 1) Функция $f(x) = \sec x = \dfrac{1}{\cos x}$ на полусегменте $[0, \pi/2)$ сверху не ограничена, а снизу ограничена (в качестве нижней грани может быть взято любое число $m \leqslant 1$).

2) Функция Дирихле [1]) ограничена с обеих сторон на любом сегменте $[a, b]$ (в качестве нижней грани можно взять любое число $m \leqslant 0$, а в качестве верхней грани любое число $M \geqslant 1$).

Теорема 8.3. *Если функция $f(x)$ имеет конечное предельное значение в точке $x = a$, то существует некоторая δ-окрестность точки a [2]), такая, что для всех значений аргумента из указанной δ-окрестности функция $f(x)$ ограничена [3]).*

Д о к а з а т е л ь с т в о. Пусть $b = \lim\limits_{x\to a} f(x)$. Согласно новому определению предельного значения функции, для некоторого положительного числа ε найдется положительное число δ такое, что $|f(x) - b| < \varepsilon$, как только $0 < |x - a| < \delta$, или

$$b - \varepsilon < f(x) < b + \varepsilon, \text{ как только } a - \delta < x < a + \delta \text{ и } x \neq a. \quad (8.3)$$

Если значение $x = a$ *не входит в область определения функции*, то теорема доказана (ибо неравенства (8.3) означают, что *для всех* значений аргумента x из δ-окрестности точки a значения функции $f(x)$ заключены между $b - \varepsilon$ и $b + \varepsilon$).

Если же функция $f(x)$ *определена и при* $x = a$ и принимает в точке a некоторое значение $f(a)$, то, обозначив через m

---

[1]) Напомним что *функцией Дирихле* называется функция, равная единице для всех рациональных значений аргумента и нулю для всех иррациональных значений аргумента.

[2]) Напомним, что *δ-окрестностью точки a* называется интервал $(a - \delta, a + \delta)$, где $\delta > 0$.

[3]) Мы не исключаем случая, когда функция $y = f(x)$ задана на некотором множестве $\{x\}$, не заполняющем сплошь никакой δ-окрестности точки a.

наименьшее из двух чисел $(b - \varepsilon)$ и $f(a)$, а M наибольшее из двух чисел $(b + \varepsilon)$ и $f(a)$, можно извлечь из неравенств (8.3) следующие неравенства:

$$m \leqslant f(x) \leqslant M,$$

как только $a - \delta < x < a + \delta$.

Рис. 8.3

Последние неравенства означают, что функция $f(x)$ ограничена всюду в δ-окрестности точки a. Теорема доказана. Иллюстрацией к теореме 8.3 может служить рис. 8.3.

Замечание. Свойство функции, устанавливаемое теоремой 8.3, называют *локальной ограниченностью функции, имеющей предельное значение.*

Следствие из теоремы 8.3. *Если функция $f(x)$ непрерывна в точке $x = a$, то эта функция ограничена для всех значений аргумента из некоторой δ-окрестности точки a.* (Непрерывная в точке $x = a$ функция имеет в этой точке конечное предельное значение).

§ 3. Теорема об устойчивости знака непрерывной функции

Теорема 8.4. *Если функция $f(x)$ непрерывна в точке $x = a$ и если $f(a) \neq 0$, то существует такая δ-окрестность точки a, что для всех значений аргумента из указанной δ-окрестности функция $f(x)$ не обращается в нуль и имеет знак, совпадающий со знаком $f(a)$.*

Доказательство. Так как функция непрерывна в точке a, то существует $\lim\limits_{x \to a} f(x) = b$, причем $b = f(a) \neq 0$. Согласно новому определению предельного значения функции, для *любого* $\varepsilon > 0$ найдется $\delta > 0$ такое, что

$$b - \varepsilon < f(x) < b + \varepsilon, \text{ как только}^{1)}\ a - \delta < x < a + \delta. \quad (8.4)$$

Возьмем в качестве ε положительное число, удовлетворяющее требованию $\varepsilon < |b|$. При таком выборе ε все три числа $b - \varepsilon$, $b + \varepsilon$ и b будут *одного знака.* Стало быть, в силу (8.4) всюду в δ-окрестности точки a функция $f(x)$ сохраняет знак числа $b = f(a)$. Теорема доказана. Иллюстрацией к теореме 8.4 может служить рис. 8.4.

[1]) При этом нет необходимости исключать значение $x = a$, ибо для непрерывной функции $f(x)$ значение $f(a) = b$ также удовлетворяет левым из неравенств (8.4).

З а м е ч а н и е к т е о р е м е 8.4. Теорему 8.4 можно перенести на случай функции $f(x)$, непрерывной в данной точке $x = a$ *справа* (*слева*). Пусть δ — некоторое положительное число. Договоримся называть полусегмент $[a, a+\delta)$ *п р а в о й п о л у о к р е с т н о с т ь ю точки* $x = a$, а полусегмент $(a - \delta, a]$ *л е в о й п о л у о к р е с т н о с т ь ю точки* $x = a$. Имеет место следующее утверждение: *если функция* $f(x)$ *непрерывна в точке* $x = a$ *справа* (*слева*) *и если* $f(a) \neq 0$, *то найдется правая* (*левая*) *полуокрестность точки* $x = a$ *такая, что для всех значений аргумента из указанной полуокрестности функция* $f(x)$ *не обращается в нуль и имеет знак, совпадающий со знаком* $f(a)$.

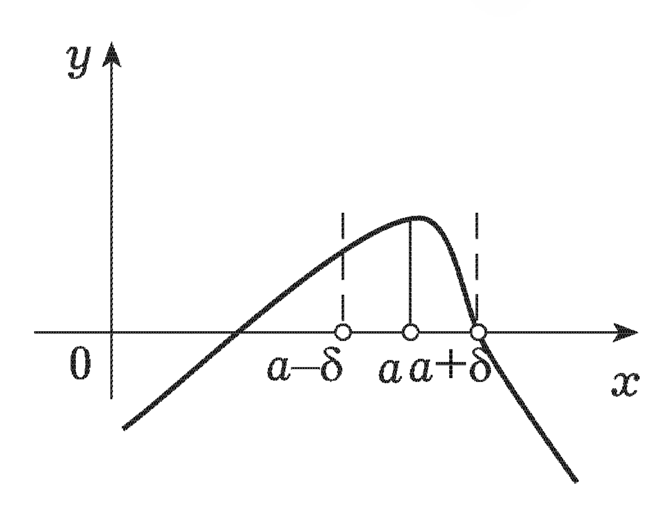


Рис. 8.4

Доказательство этого утверждения почти дословно повторяет доказательство теоремы 8.4, только вместо правых неравенств (8.4) мы получим неравенства $a \leqslant x < a + \delta$ $(a - \delta < x \leqslant a)$.

§ 4. Прохождение непрерывной функции через любое промежуточное значение

1. Прохождение непрерывной функции через нуль при смене знаков.

Теорема 8.5. *Пусть функция* $f(x)$ *непрерывна на сегменте* $[a, b]$, *и пусть значения этой функции на концах сегмента* $f(a)$ *и* $f(b)$ *суть числа разных знаков. Тогда внутри сегмента* $[a, b]$ *найдется такая точка* ξ, *значение функции в которой равно нулю.*

Д о к а з а т е л ь с т в о. Ради определенности предположим, что $f(a) < 0$, $f(b) > 0$. Рассмотрим множество $\{x\}$ *всех значений* x *из сегмента* $[a, b]$, *для которых* $f(x) < 0$. Это множество имеет хотя бы один элемент $x = a$ (ибо $f(a) < 0$), и *ограничено сверху* (например, значением $x = b$). Согласно теореме 2.1 у множества $\{x\}$ существует точная верхняя грань, которую мы обозначим через ξ.

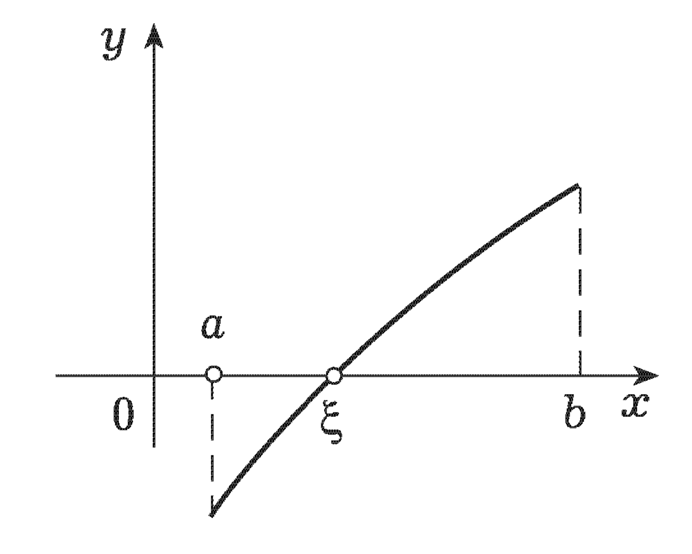


Рис. 8.5

Прежде всего, заметим, что точка ξ является *внутренней* точкой сегмента $[a, b]$, ибо из непрерывности функции $f(x)$ на сегменте $[a, b]$ и из условий $f(a) < 0$, $f(b) > 0$ в силу замечания к теореме 8.4 вытекает, что найдется правая полуокрестность точки $x = a$, в пределах которой $f(x) < 0$, и левая

полуокрестность точки $x = b$, в пределах которой $f(x) > 0$. Докажем теперь, что $f(\xi) = 0$. Если бы это было не так, то по теореме 8.4 нашлась бы δ-окрестность $\xi - \delta < x < \xi + \delta$ точки ξ, *в пределах которой функция* $f(x)$ *имела бы определенный знак.* Но это невозможно, ибо, по определению точной верхней грани, найдется хотя бы одно значение x из полусегмента $\xi - \delta < x \leqslant \xi$ такое, что $f(x) < 0$, а для любого значения x из интервала $\xi < x < \xi + \delta$ $f(x) \geqslant 0$. Итак, $f(\xi) = 0$. Теорема доказана. Иллюстрацией к теореме 8.5 может служить рис. 8.5.

2. Прохождение непрерывной функции через любое промежуточное значение.

Теорема 8.6. *Пусть функция* $f(x)$ *непрерывна на сегменте* $[a, b]$, *причем* $f(a) = A$, $f(b) = B$. *Пусть далее* C *— любое число, заключенное между* A *и* B. *Тогда на сегменте* $[a, b]$ *найдется точка* ξ *такая, что* $f(\xi) = C$.

Доказательство. Следует рассмотреть лишь случай, когда $A \neq B$ и когда C не совпадает ни с одним из чисел A и B. Пусть ради определенности $A < B$, $A < C < B$. Рассмотрим функцию $\varphi(x) = f(x) - C$. Эта функция непрерывна на сегменте $[a, b]$ (как разность непрерывных функций) и принимает на концах этого сегмента значения разных знаков

$$\varphi(a) = f(a) - C = A - C < 0, \quad \varphi(b) = f(b) - C = B - C > 0.$$

По теореме 8.5 внутри сегмента $[a, b]$ найдется точка ξ такая, что $\varphi(\xi) = f(\xi) - C = 0$. Стало быть, $f(\xi) = C$. Теорема доказана.

§ 5. Ограниченность функции, непрерывной на сегменте

Теорема 8.7 (первая теорема Вейерштрасса). *Если функция* $f(x)$ *непрерывна на сегменте* $[a, b]$, *то она ограничена на этом сегменте.*

Доказательство. Докажем, что функция $f(x)$ ограничена *сверху* на сегменте $[a, b]$ (ограниченность *снизу* доказывается совершенно аналогично).

Предположим противное, т. е. допустим, что $f(x)$ не является ограниченной сверху на сегменте $[a, b]$.

Тогда для *любого* натурального числа n ($n = 1, 2, \ldots$) найдется хотя бы одна точка x_n из сегмента $[a, b]$ такая, что $f(x_n) > n$ (иначе $f(x)$ была бы ограничена сверху на сегменте $[a, b]$).

Таким образом, существует последовательность значений x_n из сегмента $[a, b]$ такая, что соответствующая последовательность значений функции $\{f(x_n)\}$ является бесконечно большой. В силу теоремы Больцано–Вейерштрасса (см. теорему 3.17 из п. 4 § 4 гл. 3) из последовательности $\{x_n\}$ можно выделить подпоследовательность, сходящуюся к точке ξ, принадлежащей, в

силу замечания 2 к указанной теореме, сегменту $[a, b]$. Обозначим эту подпоследовательность символом $\{x_{k_n}\}$ $(n = 1, 2, \dots)$. В силу непрерывности функции $f(x)$ в точке ξ соответствующая подпоследовательность значений функции $\{f(x_{k_n})\}$ обязана сходиться к $f(\xi)$. Но это невозможно, ибо подпоследовательность $\{f(x_{k_n})\}$, будучи выделена из бесконечно большой последовательности $\{f(x_n)\}$, сама является бесконечно большой (см. п. 1 § 4 гл. 3). Полученное противоречие доказывает теорему.

З а м е ч а н и е. Для интервала (или полусегмента) утверждение, аналогичное теореме 8.7, уже несправедливо, т. е. из непрерывности функции на интервале (или полусегменте) уже не вытекает ограниченность этой функции на указанном множестве. Рассмотрим, например, функцию $f(x) = 1/x$ на интервале $(0, 1)$ (или на полусегменте $(0, 1]$). Эта функция непрерывна на указанном интервале (или полусегменте), но не является на нем ограниченной, ибо существует последовательность точек $x_n = 1/n$ $(n = 2, 3, \dots)$, принадлежащих указанному интервалу (или полусегменту), такая, что соответствующая последовательность значений функции $\{f(x_n)\} = \{n\}$ является бесконечно большой.

§ 6. Точные грани функции и их достижение функцией, непрерывной на сегменте

1. Понятие точной верхней и точной нижней граней функции на данном множестве. Рассмотрим функцию $f(x)$, ограниченную на данном множестве $\{x\}$ сверху (снизу) [1]). Используя для множества всех значений этой функции введенное в п. 5 § 1 гл. 2 понятие точной верхней (точной нижней) грани, мы придем к следующему определению. *Число M (число m) называется точной верхней (точной нижней) гранью функции $f(x)$ на множестве $\{x\}$, если выполнены следующие два требования:* 1) *для каждого значения x из множества $\{x\}$ справедливо неравенство $f(x) \leqslant M$ $(f(x) \geqslant m)$;* 2) *каково бы ни было положительное число ε, найдется хотя бы одно значение x из множества $\{x\}$, для которого справедливо неравенство*

$$f(x) > M - \varepsilon \quad (f(x) < m + \varepsilon).$$

В этом определении требование 1) утверждает, что число M (число m) является одной из верхних (нижних) граней функции $f(x)$ на множестве $\{x\}$, а требование 2) говорит о том, что эта грань является *наименьшей* (*наибольшей*) и уменьшена (увели-

[1]) Определение функции, ограниченной на данном множестве сверху (снизу), было дано в начале § 2 этой главы.

чена) быть не может. Для обозначения точной верхней и точной нижней граней функции $f(x)$ на множестве $\{x\}$ употребляют следующую символику:

$$M = \sup_{\{x\}}\{f(x)\}, \quad m = \inf_{\{x\}}\{f(x)\}.$$

Из доказанной в п. 5 § 1 гл. 2 теоремы 2.1 непосредственно вытекает следующее утверждение: *если функция $f(x)$ ограничена на множестве $\{x\}$ сверху (снизу), то у функции $f(x)$ существует на этом множестве точная верхняя (точная нижняя) грань.*

Естественно, возникает вопрос, *является ли точная верхняя (точная нижняя) грань функции достижимой*, т. е. существует ли среди точек множества $\{x\}$ такая точка x, значение функции в которой равно этой грани. Следующий пример показывает, что точная верхняя и точная нижняя грани, *вообще говоря, не являются достижимыми.*

Рассмотрим на сегменте $[0, \pi/2]$ функцию

$$f(x) = \begin{cases} \sin x & \text{при} \quad 0 < x < \pi/2, \\ 1/2 & \text{при} \quad x = 0 \text{ и } x = \pi/2. \end{cases}$$

Эта функция ограничена на сегменте $[0, \pi/2]$ и сверху и снизу и имеет на этом сегменте точную верхнюю грань $M = 1$ и точную нижнюю грань $m = 0$. Однако ни в одной точке сегмента $[0, \pi/2]$ эта функция не принимает значений, равных этим граням (рис. 8.6). Таким образом, рассмотренная нами функция не имеет на сегменте $[0, \pi/2]$ ни максимального, ни минимального значений.

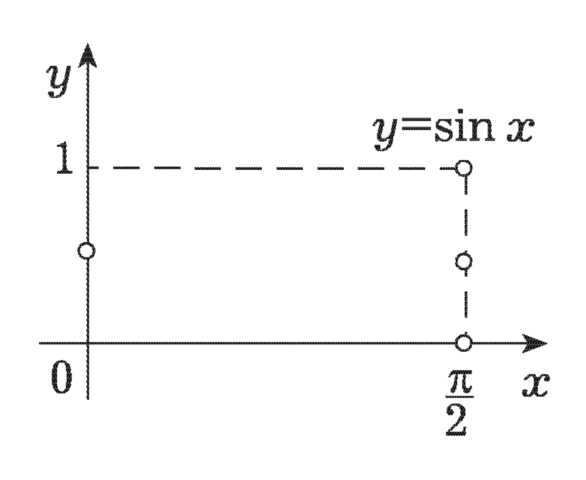


Рис. 8.6

Обратим внимание на то, что рассмотренная нами функция не является непрерывной на сегменте $[0, \pi/2]$. Это обстоятельство не является случайным, ибо, как мы докажем в следующем пункте, функция, непрерывная на сегменте, обязательно достигает в некоторых точках этого сегмента своих точных верхней и нижней граней.

2. Достижение функцией, непрерывной на сегменте, своих точных граней. Пусть функция $f(x)$ непрерывна на некотором сегменте $[a, b]$. Тогда в силу теоремы 8.7 эта функция ограничена на этом сегменте и сверху, и снизу. Стало быть, в силу утверждения, сформулированного в предыдущем пункте, у этой функции существуют на сегменте $[a, b]$ точная верхняя грань M и точная нижняя грань m. Докажем, что эти грани достижимы.

Теорема 8.8 (вторая теорема Вейерштрасса). *Если функция $f(x)$ непрерывна на сегменте $[a, b]$, то она достигает на этом сегменте своих точных верхней и нижней граней* (т. е. на сегменте $[a, b]$ найдутся такие точки x_1 и x_2, что $f(x_1) = M$, $f(x_2) = m$).

Доказательство. Докажем, что функция $f(x)$ достигает на сегменте $[a, b]$ своей точной верхней грани M (достижение точной нижней грани доказывается аналогично).

Предположим противное, т. е. предположим, что функция $f(x)$ не принимает ни в одной точке сегмента $[a, b]$ значения, равного M. Тогда *для всех* точек сегмента $[a, b]$ справедливо неравенство $f(x) < M$, и мы можем рассмотреть на сегменте $[a, b]$ всюду положительную функцию

$$F(x) = \frac{1}{M - f(x)}.$$

Так как знаменатель $M - f(x)$ не обращается в нуль и непрерывен на сегменте $[a, b]$, то по теореме 4.2 функция $F(x)$ также непрерывна на сегменте $[a, b]$. В таком случае, согласно теореме 8.7, функция $F(x)$ ограничена на сегменте $[a, b]$, т. е. найдется положительное число B такое, что для всех x из сегмента $[a, b]$

$$F(x) = \frac{1}{M - f(x)} \leqslant B.$$

Последнее неравенство (с учетом того, что $M - f(x) > 0$) можно переписать в виде

$$f(x) \leqslant M - \frac{1}{B}.$$

Написанное соотношение, справедливое *для всех* точек x из сегмента $[a, b]$, противоречит тому, что число M является точной верхней гранью (*наименьшей из всех верхних граней*) функции $f(x)$ на сегменте $[a, b]$. Полученное противоречие доказывает теорему.

Замечание 1. Для интервала и полусегмента утверждение, аналогичное теореме 8.8, не имеет места. В самом деле, в замечании к теореме 8.7 (см. § 5) мы привели пример функции, непрерывной на интервале (полусегменте) и не являющейся на нем ограниченной (у такой функции точная верхняя (или нижняя) грань не только не достигается, но даже не существует!).

Замечание 2. После того как доказано, что функция $f(x)$, непрерывная на сегменте, достигает на этом сегменте своих точных верхней и нижней граней, мы можем назвать точную верхнюю грань *максимальным значением*, а точную нижнюю грань *минимальным значением* функции $f(x)$ на этом сегменте и сформулировать теорему 8.8 в виде: *непрерывная на сегменте*

функция имеет на этом сегменте максимальное и минимальное значения[1]).

З а м е ч а н и е 3. К числу других свойств функции, непрерывной на сегменте, относится свойство, называемое *равномерной непрерывностью*. Это свойство мы изучим в § 4 гл. 10. Здесь мы лишь отметим, что весь материал пп. 1 и 2 § 4 гл. 10 может быть прочитан непосредственно вслед за материалом настоящего параграфа.

§ 7. Возрастание (убывание) функции в точке. Локальный максимум (минимум)

1. Возрастание (убывание) функции в точке. Будем предполагать, что функция $f(x)$ определена всюду в некоторой окрестности точки c.

Определение. *Говорят, что функция $f(x)$ в о з р а с т а е т (у б ы в а е т) в т о ч к е c, если найдется такая окрестность точки c, в пределах которой $f(x) > f(c)$ при $x > c$ и $f(x) < f(c)$ при $x < c$ ($f(x) < f(c)$ при $x > c$ и $f(x) > f(c)$ при $x < c$).*

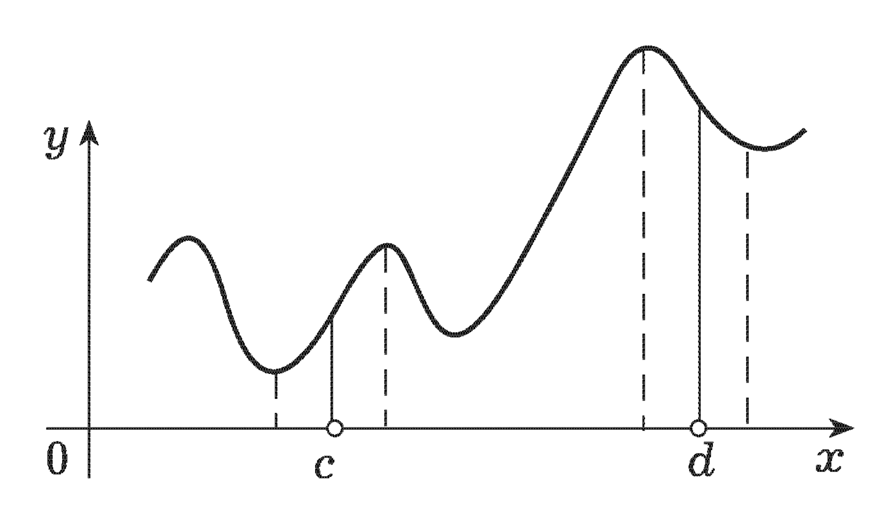


Рис. 8.7

На рис. 8.7 изображена функция, возрастающая в точке c и убывающая в точке d.

Установим *достаточное условие возрастания (убывания) функции $f(x)$ в точке c.*

Теорема 8.9. *Если функция $f(x)$ дифференцируема в точке c и $f'(c) > 0$ ($f'(c) < 0$), то эта функция возрастает (убывает) в точке c.*

Д о к а з а т е л ь с т в о. Докажем теорему для случая $f'(c) > 0$ (случай $f'(c) < 0$ рассматривается совершенно аналогично). Поскольку

$$f'(c) = \lim_{x\to c} \frac{f(x) - f(c)}{x - c},$$

[1]) Отметим, что и разрывные на некотором сегменте функции могут иметь на этом сегменте максимальное и минимальное значения. Так, например, уже известная нам из § 1 гл. 4 функция Дирихле

$$y = \begin{cases} 1, & \text{если } x \text{ рационально}, \\ 0, & \text{если } x \text{ иррационально}, \end{cases}$$

разрывна в любой точке любого сегмента $[a, b]$, но имеет на этом сегменте максимальное значение, равное единице, и минимальное значение, равное нулю.

то, по новому определению предельного значения функции, *для любого* $\varepsilon > 0$ найдется положительное δ такое, что

$$f'(c) - \varepsilon < \frac{f(x) - f(c)}{x - c} < f'(c) + \varepsilon \text{ при } 0 < |x - c| < \delta. \qquad (8.5)$$

Возьмем в качестве ε положительное число, меньшее $f'(c)$. Тогда $f'(c) - \varepsilon > 0$ и, стало быть, из (8.5) получим

$$\frac{f(x) - f(c)}{x - c} > 0 \text{ при } 0 < |x - c| < \delta. \quad (8.6)$$

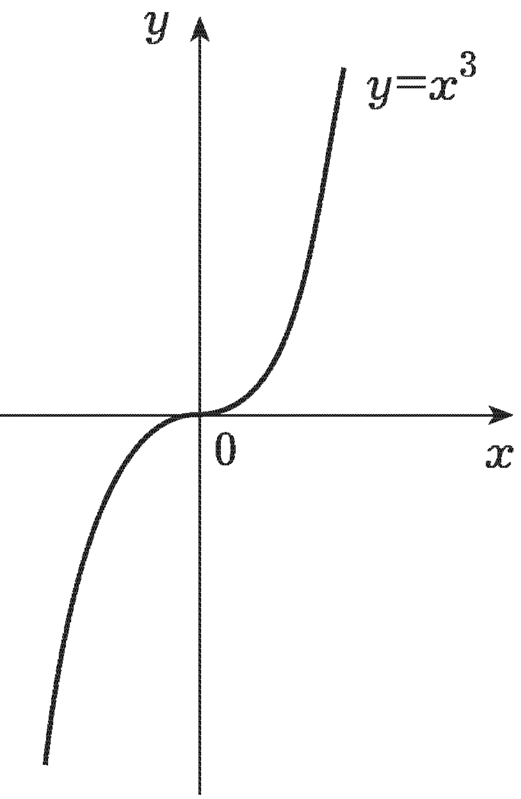


Рис. 8.8

Из (8.6) следует, что *всюду в δ-окрестности точки c $f(x) > f(c)$* при $x > c$ и $f(x) < f(c)$ при $x < c$. Возрастание функции $f(x)$ в точке c доказано.

З а м е ч а н и е. Подчеркнем, что *положительность* (*отрицательность*) *производной $f'(c)$ не является необходимым условием возрастания* (*убывания*) *функции $f(x)$ в точке c*. В качестве примера укажем на функцию $f(x) = x^3$, которая возрастает в точке $x = 0$ и тем не менее имеет в этой точке производную $f'(0) = 0$ (график этой функции изображен на рис. 8.8).

2. Локальный максимум и локальный минимум функции. Пусть снова функция $f(x)$ определена всюду в некоторой окрестности точки c.

Определение. *Говорят, что функция $f(x)$ имеет в точке c л о к а л ь н ы й м а к с и м у м* (*м и н и м у м*), *если найдется такая окрестность точки c, в пределах которой значение $f(c)$ является наибольшим* (*наименьшим*) *среди всех значений этой функции.*

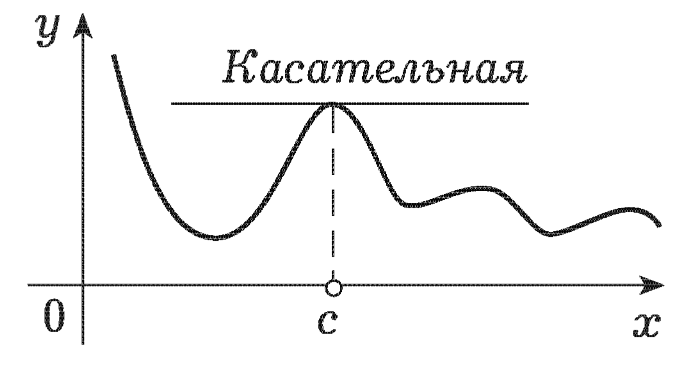


Рис. 8.9

На рис. 8.9 изображена функция $f(x)$, имеющая локальный максимум в точке c.

Локальный максимум и локальный минимум объединяются общим названием *л о к а л ь н ы й э к с т р е м у м.*

Установим *необходимое условие экстремума* дифференцируемой функции.

Теорема 8.10. *Если функция $f(x)$ дифференцируема в точке c и имеет в этой точке локальный экстремум, то $f'(c) = 0$.*

Доказательство. Так как функция $f(x)$ имеет локальный экстремум в точке c, то $f(x)$ не может в этой точке ни возрастать, ни убывать. Стало быть, в силу теоремы 8.9 производная $f'(c)$ не может быть ни положительна, ни отрицательна, т. е. $f'(c) = 0$.

Теорема 8.10 имеет простой геометрический смысл: она утверждает, что если в точке кривой $y = f(x)$, которой соответствует локальный экстремум функции $f(x)$, существует касательная к графику функции $y = f(x)$, то эта касательная параллельна оси Ox (см. рис. 8.9).

§ 8. Теорема о нуле производной

Теорема 8.11 (теорема Ролля[1]). *Пусть функция $f(x)$ непрерывна на сегменте $[a, b]$ и дифференцируема во всех внутренних точках этого сегмента. Пусть, кроме того, $f(a) = f(b)$. Тогда внутри сегмента $[a, b]$ найдется точка ξ такая, что значение производной в этой точке $f'(\xi)$ равно нулю.*

Кратко можно сказать, что между двумя равными значениями дифференцируемой функции обязательно лежит нуль производной этой функции.

Доказательство. Так как функция $f(x)$ непрерывна на сегменте $[a, b]$, то, согласно теореме 8.8, эта функция *достигает* на этом сегменте своего максимального значения M и своего минимального значения m. Могут представиться два случая: 1) $M = m$; 2) $M > m$. В случае 1) $f(x) = M = m = \text{const}$. Поэтому производная $f'(x)$ *равна нулю в любой точке сегмента* $[a, b]$. В случае $M > m$, поскольку $f(a) = f(b)$, можно утверждать, что *хотя бы одно* из двух значений M или m достигается функцией в некоторой *внутренней* точке ξ сегмента $[a, b]$. Но тогда функция $f(x)$ имеет в этой точке ξ локальный экстремум. Поскольку функция $f(x)$ дифференцируема в точке ξ, то по теореме 8.10 $f'(\xi) = 0$. Теорема полностью доказана.

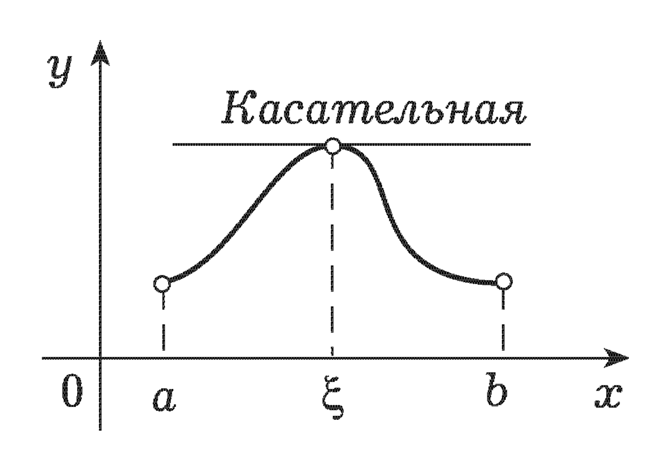


Рис. 8.10

Теорема Ролля имеет простой геометрический смысл: если крайние ординаты кривой $y = f(x)$ равны, то, согласно теореме Ролля, на кривой $y = f(x)$ найдется точка, в которой касательная к кривой параллельна оси Ox (рис. 8.10).

Как мы увидим ниже, теорема Ролля лежит в основе многих формул и теорем математического анализа.

[1]) Мишель Ролль — французский математик (1652–1719).

§ 9. Формула конечных приращений (формула Лагранжа)

Большое значение в анализе и его приложениях имеет следующая теорема, принадлежащая Лагранжу [1]).

Теорема 8.12 (теорема Лагранжа). *Если функция $f(x)$ непрерывна на сегменте $[a, b]$ и дифференцируема во всех внутренних точках этого сегмента, то внутри сегмента $[a, b]$ найдется точка ξ такая, что справедлива формула*

$$f(b) - f(a) = f'(\xi)(b - a). \tag{8.7}$$

Формулу (8.7) называют *формулой Лагранжа* или *формулой конечных приращений.*

Доказательство. Рассмотрим на сегменте $[a, b]$ следующую вспомогательную функцию:

$$F(x) = f(x) - f(a) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a}(x - a). \tag{8.8}$$

Проверим, что для функции $F(x)$ выполнены все условия теоремы Ролля. В самом деле, $F(x)$ непрерывна на сегменте $[a, b]$ (как разность функции $f(x)$ и линейной функции) и во всех внутренних точках сегмента $[a, b]$ имеет производную, равную

$$F'(x) = f'(x) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a}.$$

Из формулы (8.8) очевидно, что $F(a) = F(b) = 0$.

Согласно теореме Ролля внутри сегмента $[a, b]$ найдется точка ξ такая, что

$$F'(\xi) = f'(\xi) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a} = 0. \tag{8.9}$$

Из равенства (8.9) вытекает формула Лагранжа (8.7). Подчеркнем, что в формуле (8.7) вовсе не обязательно считать, что $b > a$.

Замечание. Мы получили теорему Лагранжа как следствие теоремы Ролля. Заметим вместе с тем, что сама теорема Ролля является частным случаем теоремы Лагранжа (при $f(a) = f(b)$).

Для выяснения геометрического смысла теоремы Лагранжа заметим, что величина $\frac{f(b) - f(a)}{b - a}$ есть угловой коэффициент секущей, проходящей через точки $A(a, f(a))$ и $B(b, f(b))$ кривой $y = f(x)$, а $f'(\xi)$ есть угловой коэффициент касательной к кривой $y = f(x)$, проходящей через точку $C(\xi, f(\xi))$. Формула Лагранжа (8.7) означает, что на кривой $y = f(x)$ между точками A

[1]) Жозеф Луи Лагранж — великий французский математик и механик (1736–1813).

и B найдется такая точка C, касательная в которой параллельна секущей AB (рис. 8.11).

Часто бывает удобно записывать формулу Лагранжа в виде, несколько отличном от (8.7). Пусть $f(x)$ удовлетворяет условиям теоремы 8.11. Зафиксируем любое x_0 из сегмента $[a, b]$ и зададим ему приращение Δx произвольное, но такое, чтобы значение $(x_0 + \Delta x)$ также лежало на сегменте $[a, b]$. Тогда, записывая формулу Лагранжа для сегмента $[x_0, x_0 + \Delta x]$, будем иметь

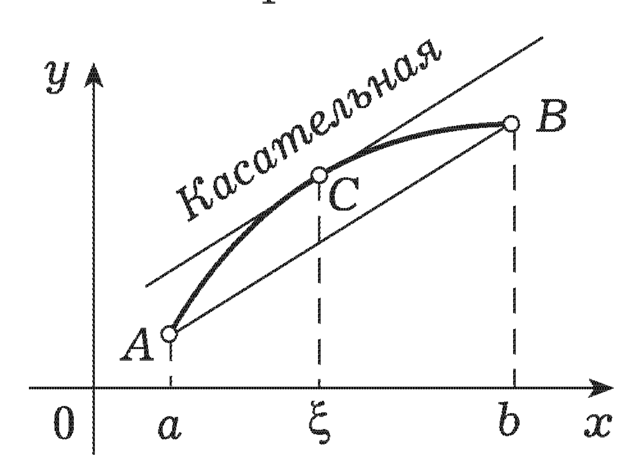


Рис. 8.11

$$f(x_0 + \Delta x) - f(x_0) = \Delta x f'(\xi), \quad (8.10)$$

где ξ — некоторая точка, лежащая между x_0 и $x_0 + \Delta x$. Можно утверждать, что *найдется такое* (зависящее от Δx) *число* θ *из интервала* $0 < \theta < 1$, *что* $\xi = x_0 + \theta\Delta x$. Таким образом, формуле (8.10) можно придать вид

$$f(x_0 + \Delta x) - f(x_0) = \Delta x f'(x_0 + \theta\Delta x), \quad (8.11)$$

где θ — некоторое число из интервала $0 < \theta < 1$. Формула Лагранжа в виде (8.11) дает точное выражение для приращения функции через вызвавшее его произвольное конечное приращение Δx аргумента. Этот вид формулы Лагранжа оправдывает термин «формула конечных приращений».

§ 10. Некоторые следствия из формулы Лагранжа

1. Постоянство функции, имеющей на интервале равную нулю производную.

Теорема 8.13. *Если функция $f(x)$ дифференцируема на интервале (a, b) и если всюду на этом интервале $f'(x) = 0$, то функция $f(x)$ является постоянной на интервале (a, b).*

Доказательство. Пусть x_0 — некоторая *фиксированная* точка интервала (a, b), а x — *любая* точка этого интервала.

Сегмент $[x_0, x]$ целиком принадлежит интервалу (a, b). Поэтому функция $f(x)$ дифференцируема (а стало быть, и непрерывна) всюду на сегменте $[x_0, x]$. Это дает право применить к функции $f(x)$ на сегменте $[x_0, x]$ теорему Лагранжа. Согласно этой теореме внутри сегмента $[x_0, x]$ найдется точка ξ такая, что

$$f(x) - f(x_0) = (x - x_0)f'(\xi). \quad (8.12)$$

По условию производная функции $f(x)$ равна нулю всюду в интервале (a, b). Стало быть, $f'(\xi) = 0$ и из формулы (8.12) мы получим

$$f(x) = f(x_0). \quad (8.13)$$

Равенство (8.13) утверждает, что значение функции $f(x)$ в *любой* точке x интервала (a, b) равно ее значению в *фиксированной* точке x_0. Это и означает, что функция $f(x)$ *постоянна всюду на интервале* (a, b). Теорема доказана.

Теорема 8.13 имеет простой геометрический смысл: если касательная в каждой точке некоторого участка кривой $y = f(x)$ параллельна оси Ox, то указанный участок кривой $y = f(x)$ представляет собой отрезок прямой, параллельной оси Ox.

З а м е ч а н и е. Теорема 8.13 уже была использована нами в гл. 6 при доказательстве теоремы 6.1. Здесь мы еще раз подчеркнем, что весь материал настоящей главы (в том числе и теорема 8.13) совершенно не использует результатов глав 6 и 7. При повторном чтении этой книги гл. 8 можно читать непосредственно вслед за гл. 5, а уже затем возвратиться к чтению глав 6 и 7.

2. Условия монотонности функции на интервале. В качестве второго следствия формулы Лагранжа рассмотрим вопрос об условиях, обеспечивающих неубывание (невозрастание) функции на данном интервале.

Прежде всего, напомним определения неубывания, невозрастания, возрастания и убывания функции на данном интервале.

1°. Говорят, что функция $f(x)$ *не убывает* (*не возрастает*) *на интервале* (a, b), если для любых двух точек x_1 и x_2 интервала (a, b), удовлетворяющих условию $x_1 < x_2$, справедливо неравенство

$$f(x_1) \leqslant f(x_2) \quad (f(x_1) \geqslant f(x_2)).$$

2°. Говорят, что функция $f(x)$ *возрастает* (*убывает*) *на интервале* (a, b), если для любых точек x_1 и x_2 интервала (a, b), связанных условием $x_1 < x_2$, справедливо неравенство

$$f(x_1) < f(x_2) \quad (f(x_1) > f(x_2)).$$

Теорема 8.14. *Для того чтобы дифференцируемая на интервале (a, b) функция $f(x)$ не убывала (не возрастала) на этом интервале, необходимо и достаточно, чтобы производная этой функции была неотрицательной (неположительной) всюду на этом интервале.*

Д о к а з а т е л ь с т в о. 1) Д о с т а т о ч н о с т ь. Пусть $f'(x) \geqslant 0$ ($\leqslant 0$) всюду на интервале (a, b). Требуется доказать, что $f(x)$ не убывает (не возрастает) на интервале (a, b). Пусть x_1 и x_2 — любые две точки интервала (a, b), удовлетворяющие условию $x_1 < x_2$. Функция $f(x)$ дифференцируема (а стало быть, и непрерывна) всюду на сегменте $[x_1, x_2]$. Поэтому к $f(x)$ можно применить на сегменте $[x_1, x_2]$ теорему Лагранжа, в результате чего получим

$$f(x_2) - f(x_1) = (x_2 - x_1) f'(\xi), \tag{8.14}$$

где $x_1 < \xi < x_2$.

По условию $f'(\xi) \geqslant 0$ ($\leqslant 0$), $x_2 - x_1 > 0$. Поэтому правая часть (8.14) неотрицательна (неположительна), что и доказывает неубывание (невозрастание) $f(x)$ на интервале (a, b).

2) Необходимость. Пусть функция $f(x)$ дифференцируема на интервале (a, b) и не убывает (не возрастает) на этом интервале. Требуется доказать, что $f'(x) \geqslant 0$ ($\leqslant 0$) всюду на этом интервале. Так как $f(x)$ не убывает (не возрастает) на интервале (a, b), то эта функция *не может убывать* (*возрастать*) *ни в одной точке интервала* (a, b). Стало быть, в силу теоремы 8.9, производная $f'(x)$ *ни в одной точке интервала* (a, b) *не может быть отрицательной* (*положительной*), что и требовалось доказать.

Теорема 8.15. *Для того чтобы функция $f(x)$ возрастала (убывала) на интервале (a, b) достаточно, чтобы производная $f'(x)$ была положительной (отрицательной) всюду на этом интервале.*

Доказательство проводится по той же схеме, что и доказательство достаточности в теореме 8.14. Пусть x_1 и x_2 — любые две точки интервала (a, b), удовлетворяющие условию $x_1 < x_2$. Записывая для сегмента $[x_1, x_2]$ формулу Лагранжа, получим равенство (8.14), но на этот раз в этом равенстве $f'(\xi) > 0$ (< 0).

Вследствие этого левая часть (8.14) положительна (отрицательна), что и доказывает возрастание (убывание) $f(x)$ на интервале (a, b).

Замечание. Подчеркнем, что положительность (отрицательность) производной $f'(x)$ на интервале (a, b) *не является необходимым условием* возрастания (убывания) функции $f(x)$ на интервале (a, b). Так, функция $y = x^3$ возрастает на интервале $(-1, +1)$, но производная этой функции $f'(x) = 3x^2$ не является всюду положительной на этом интервале (она обращается в нуль в точке $x = 0$). Вообще, легко доказать, что функция $f(x)$ возрастает (убывает) на интервале (a, b), если производная этой функции $f'(x)$ положительна (отрицательна) всюду на этом интервале, *за исключением конечного числа точек*, в которых эта производная равна нулю. (Для доказательства достаточно применить теорему 8.15 к каждому из конечного числа интервалов, на которых $f'(x)$ строго положительна (отрицательна) и учесть непрерывность $f(x)$ в тех точках, в которых производная равна нулю.) Установленную теоре-

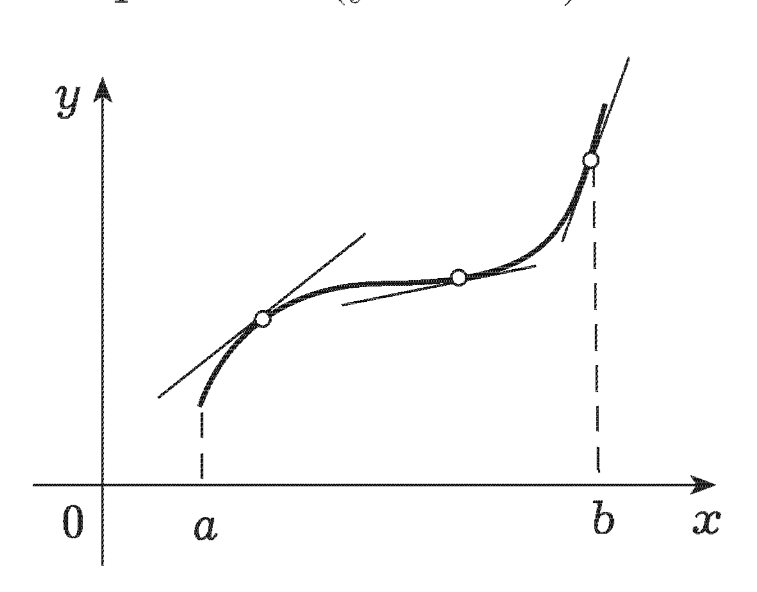


Рис. 8.12

мой 8.15 связь между знаком производной и направлением изменения функции легко понять из геометрических соображений. Поскольку производная равна угловому коэффициенту касательной к графику функции $y = f(x)$, знак производной указывает острый или тупой угол с положительным направлением оси Ox составляет луч касательной, лежащий в верхней полуплоскости. Если $f'(x) > 0$ всюду на интервале (a, b), то всюду на этом интервале луч касательной, лежащий в верхней полуплоскости, составляет с Ox острый угол, стало быть и кривая $y = f(x)$ идет вверх всюду на этом интервале (рис. 8.12).

3. Отсутствие у производной точек разрыва 1-го рода и устранимого разрыва. Применим теорему Лагранжа для выяснения одного замечательного свойства производной. Прежде всего докажем следующее утверждение. *Пусть функция $f(x)$ имеет конечную производную всюду в правой (левой) полуокрестности точки c и правую (левую) производную в самой точке c. Тогда, если производная $f'(x)$ имеет в точке c правое (левое) предельное значение, то это предельное значение равно правой (левой) производной в точке c.*

Для доказательства этого утверждения рассмотрим любую последовательность $\{x_n\}$ значений аргумента, сходящуюся к c справа (слева). Учитывая, что, начиная с достаточно большого номера n, все x_n принадлежат той полуокрестности, в которой функция $f(x)$ имеет конечную первую производную, применим теорему Лагранжа к функции $f(x)$ по сегменту [1] $[c, x_n]$ ($[x_n, c]$). При этом получим

$$\frac{f(x_n) - f(c)}{x_n - c} = f'(\xi_n), \tag{8.15}$$

где через ξ_n обозначена некоторая точка, лежащая между c и x_n. Пусть теперь в равенстве (8.15) $n \to \infty$. Тогда, очевидно, $\xi_n \to c$ справа (слева). Поскольку по условию $f'(x)$ имеет в точке c конечное правое (левое) предельное значение, правая часть (8.15), по определению предельного значения, обязана при $n \to \infty$ стремиться к указанному предельному значению. Стало быть, существует предел при $n \to \infty$ и левой части (8.15). По определению правой (левой) производной этот предел равен $f'(c + 0)$ ($f'(c - 0)$). Итак, в пределе при $n \to \infty$ равенство (8.15) дает

$$f'(c + 0) = \lim_{x \to c+0} f'(x) \quad \left(f'(c - 0) = \lim_{x \to c-0} f'(x)\right).$$

---

[1] Все условия теоремы Лагранжа выполнены, ибо функция $f(x)$ дифференцируема (а стало быть, и непрерывна) в любой точке сегмента $[c, x_n]$ ($[x_n, c]$), за исключением точки c. Непрерывность $f(x)$ в точке c справа (слева) следует из существования $f'(c + 0)$ ($f'(c - 0)$).

Если дополнительно потребовать равенства $f'(c+0) = f'(c-0)$, то из существования пределов $\lim\limits_{x\to c+0} f'(x)$ и $\lim\limits_{x\to c-0} f'(x)$ будет следовать непрерывность $f'(x)$ в точке c.

Применяя только что доказанное утверждение в каждой точке c некоторого интервала (a, b), мы придем к следующему утверждению: *если функция $f(x)$ имеет конечную производную всюду на интервале (a, b), то $f'(x)$ не может иметь на этом интервале ни точек устранимого разрыва, ни точек разрыва 1-го рода.*

В самом деле, если в некоторой точке c интервала (a, b) существуют конечные правое и левое предельные значения $f'(x)$, то $f'(x)$ *непрерывна в точке c* (в силу доказанного выше утверждения). Если же хотя бы одного из указанных двух предельных значений не существует, то $f'(x)$ *имеет в точке c разрыв 2-го рода.* Приведем пример функции, производная которой существует и конечна всюду на некотором интервале и имеет в некоторой точке этого интервала разрыв 2-го рода. Рассмотрим на интервале $(-1, +1)$ функцию

$$f(x) = \begin{cases} x^2 \cos\dfrac{1}{x} & \text{при} \quad x \neq 0, \\ 0 & \text{при} \quad x = 0. \end{cases}$$

Очевидно, что для любого $x \neq 0$ производная этой функции существует и определяется формулой $f'(x) = 2x\cos\dfrac{1}{x} + \sin\dfrac{1}{x}$. Существование производной $f'(0)$ в точке $x = 0$ непосредственно вытекает из существования предельного значения

$$\lim_{\Delta x\to 0} \frac{f(0+\Delta x) - f(0)}{\Delta x} = \lim_{\Delta x\to 0} \Delta x \cos\frac{1}{\Delta x} = 0.$$

Производная $f'(x)$ не имеет в точке $x = 0$ ни правого, ни левого предельного значения, ибо у слагаемого $2x\cos\dfrac{1}{x}$ существует в точке $x = 0$ равное нулю предельное значение, а слагаемое $\sin\dfrac{1}{x}$ не имеет в этой точке ни правого, ни левого предельного значения (см. пример в конце п. 1 § 8 гл. 4).

4. Вывод некоторых неравенств. В заключение покажем, как с помощью теоремы Лагранжа могут быть получены некоторые весьма полезные неравенства. В качестве примера установим следующие два неравенства:

$$|\sin x_1 - \sin x_2| \leqslant |x_1 - x_2|, \tag{8.16}$$

$$|\operatorname{arctg} x_1 - \operatorname{arctg} x_2| \leqslant |x_1 - x_2|. \tag{8.17}$$

(Здесь под x_1 и x_2 можно понимать любые значения аргумента.) Для установления неравенства (8.16) применим теорему Лагран-

жа к функции $f(x) = \sin x$ по сегменту $[x_1, x_2]$. Получим

$$\sin x_1 - \sin x_2 = (x_1 - x_2)f'(\xi). \tag{8.18}$$

Учитывая, что $f'(\xi) = \cos\xi$ и что $|\cos\xi| \leqslant 1$ для любого ξ, получим, переходя в (8.18) к модулям, неравенство (8.16).

Для установления неравенства (8.17) следует применить теорему Лагранжа по сегменту $[x_1, x_2]$ к функции $f(x) = \operatorname{arctg} x$ и учесть, что $f'(\xi) = \dfrac{1}{1+\xi^2} \leqslant 1$.

§ 11. Обобщенная формула конечных приращений (формула Коши)

В этом параграфе мы докажем теорему, принадлежащую Коши и обобщающую установленную выше теорему Лагранжа.

Теорема 8.16 (теорема Коши). *Если каждая из двух функций $f(x)$ и $g(x)$ непрерывна на сегменте $[a, b]$ и дифференцируема во всех внутренних точках этого сегмента и если, кроме того, производная $g'(x)$ отлична от нуля всюду внутри сегмента $[a, b]$, то внутри этого сегмента найдется точка ξ такая, что справедлива формула*

$$\frac{f(b) - f(a)}{g(b) - g(a)} = \frac{f'(\xi)}{g'(\xi)}. \tag{8.19}$$

Формулу (8.19) называют *обобщенной формулой конечных приращений* или *формулой Коши*.

Доказательство. Прежде всего докажем, что $g(a) \neq g(b)$. В самом деле, если бы это было не так, то для функции $g(x)$ были бы выполнены на сегменте $[a, b]$ все условия теоремы 8.11 (Ролля) и по этой теореме внутри сегмента $[a, b]$ нашлась бы точка ξ такая, что $g'(\xi) = 0$. Последнее противоречит условию теоремы. Итак, $g(a) \neq g(b)$, и мы имеем право рассмотреть следующую вспомогательную функцию:

$$F(x) = f(x) - f(a) - \frac{f(b) - f(a)}{g(b) - g(a)}[g(x) - g(a)]. \tag{8.20}$$

В силу требований, наложенных на функции $f(x)$ и $g(x)$, функция $F(x)$ непрерывна на сегменте $[a, b]$ и дифференцируема во всех внутренних точках этого сегмента. Кроме того, очевидно, что $F(a) = F(b) = 0$. Таким образом, для $F(x)$ выполнены все условия теоремы 8.11 (Ролля). Согласно этой теореме внутри сегмента $[a, b]$ найдется точка ξ такая, что

$$F'(\xi) = 0. \tag{8.21}$$

Имея в виду, что $F'(x) = f'(x) - \dfrac{f(b) - f(a)}{g(b) - g(a)}g'(x)$, и используя

равенство (8.21), будем иметь

$$f'(\xi) - \frac{f(b) - f(a)}{g(b) - g(a)} g'(\xi) = 0. \tag{8.22}$$

Учитывая, что $g'(\xi) \neq 0$, из равенства (8.22) получим формулу Коши (8.19). Теорема доказана.

Замечание 1. Формула Лагранжа (8.7) является частным случаем формулы Коши (8.19) при $g(x) = x$.

Замечание 2. В формуле (8.19) вовсе не обязательно считать, что $b > a$.

§ 12. Раскрытие неопределенностей (правило Лопиталя)

1. Раскрытие неопределенности вида $\frac{0}{0}$. Будем говорить, что отношение двух функций $\frac{f(x)}{g(x)}$ представляет собой при $x \to a$ неопределенность вида $\frac{0}{0}$, если

$$\lim_{x \to a} f(x) = \lim_{x \to a} g(x) = 0.$$

Раскрыть эту неопределенность — это значит вычислить предельное значение $\lim\limits_{x \to a} \frac{f(x)}{g(x)}$ (при условии, что это предельное значение существует).

Следующая теорема дает правило для раскрытия неопределенности вида $\frac{0}{0}$.

***Теорема 8.17* (*правило Лопиталя*[1]).** *Пусть две функции $f(x)$ и $g(x)$ определены и дифференцируемы всюду в некоторой окрестности точки a, за исключением, быть может, самой точки a. Пусть, далее,*

$$\lim_{x \to a} f(x) = \lim_{x \to a} g(x) = 0$$

и производная $g'(x)$ отлична от нуля всюду в указанной выше окрестности точки a. Тогда, если существует (конечное или бесконечное) предельное значение[2]

$$\lim_{x \to a} \frac{f'(x)}{g'(x)}, \tag{8.23}$$

---

[1]) Гильом Франсуа де Лопиталь — французский математик (1661–1704).

[2]) Отметим, что предельное значение (8.23) может не существовать, тогда как предел отношения функций $\lim\limits_{x \to a} \frac{f(x)}{g(x)}$ существует. Например, можно взять $a = 0$, $f(x) = x^2 \sin \frac{1}{x}$, $g(x) = \sin x$. Таким образом, правило Лопиталя «действует» не всегда.

то существует и предельное значение $\lim\limits_{x\to a}\dfrac{f(x)}{g(x)}$, *причем справедлива формула*

$$\lim_{x\to a}\frac{f(x)}{g(x)}=\lim_{x\to a}\frac{f'(x)}{g'(x)}. \tag{8.24}$$

Теорема 8.17 дает нам правило для раскрытия неопределенности вида $\frac{0}{0}$, сводящее вычисление предельного значения отношения двух функций к вычислению предельного значения отношения их производных.

Доказательство. Пусть $\{x_n\}$ — произвольная последовательность значений аргумента, сходящаяся к a и состоящая из чисел, отличных от a. Будем рассматривать эту последовательность, *начиная с того номера* n, *с которого все* x_n *принадлежат окрестности точки* a, *указанной в формулировке теоремы.* Доопределим функции $f(x)$ и $g(x)$ в точке a, положив их равными нулю в этой точке. Тогда, очевидно, $f(x)$ и $g(x)$ будут *непрерывны* на всем сегменте $[a,x_n]$ и дифференцируемы во всех внутренних точках этого сегмента. Кроме того, $g'(x)$ отлична от нуля всюду внутри этого сегмента. Таким образом, для $f(x)$ и $g(x)$ на сегменте $[a,x_n]$ выполнены все условия теоремы 8.16 (Коши). Согласно этой теореме внутри сегмента $[a,x_n]$ найдется точка ξ_n такая, что

$$\frac{f(x_n)-f(a)}{g(x_n)-g(a)}=\frac{f'(\xi_n)}{g'(\xi_n)}. \tag{8.25}$$

Учитывая, что, по нашему доопределению, $f(a)=g(a)=0$, мы можем следующим образом переписать формулу (8.25):

$$\frac{f(x_n)}{g(x_n)}=\frac{f'(\xi_n)}{g'(\xi_n)}. \tag{8.26}$$

Пусть теперь в формуле (8.26) $n\to\infty$. Тогда, очевидно, $\xi_n\to a$. Так как мы предположили существование предельного значения (8.23), правая часть (8.26) при $n\to\infty$ обязана стремиться к этому предельному значению. Стало быть, существует предел при $n\to\infty$ и левой части (8.26). По определению предельного значения функции этот предел равен $\lim\limits_{x\to a}\dfrac{f(x)}{g(x)}$. Таким образом, в пределе при $n\to\infty$ равенство (8.26) переходит в равенство (8.24). Теорема доказана.

Замечание 1. Если к условиям теоремы 8.17 добавить требование непрерывности производных $f'(x)$ и $g'(x)$ в точке a, то при условии $g'(a)\neq 0$ формула (8.24) может быть переписана в виде

$$\lim_{x\to a}\frac{f(x)}{g(x)}=\frac{f'(a)}{g'(a)}. \tag{8.27}$$

З а м е ч а н и е 2. Если производные $f'(x)$ и $g'(x)$ удовлетворяют тем же требованиям, что и сами функции $f(x)$ и $g(x)$, то правило Лопиталя можно применять повторно (т. е. предельное значение отношения первых производных функций $f(x)$ и $g(x)$ можно заменить предельным значением *отношения вторых производных* этих функций). Мы получим при этом

$$\lim_{x\to a}\frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x\to a}\frac{f'(x)}{g'(x)} = \lim_{x\to a}\frac{f''(x)}{g''(x)}.$$

З а м е ч а н и е 3. Теорема 8.17 легко переносится на случай, когда аргумент x стремится не к конечному, а к *бесконечному пределу* $a = +\infty$ или $a = -\infty$. Ограничимся тем, что сформулируем теорему 8.17 для случая, когда $a = +\infty$. *Пусть две функции $f(x)$ и $g(x)$ определены и дифференцируемы всюду на полупрямой $c < x < \infty$. Пусть, далее, $\lim\limits_{x\to+\infty} f(x) = \lim\limits_{x\to+\infty} g(x) = 0$ и производная $g'(x)$ отлична от нуля на указанной полупрямой. Тогда, если существует предельное значение $\lim\limits_{x\to+\infty}\frac{f'(x)}{g'(x)}$, то существует и предельное значение $\lim\limits_{x\to+\infty}\frac{f(x)}{g(x)}$, причем справедливо равенство*

$$\lim_{x\to+\infty}\frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x\to+\infty}\frac{f'(x)}{g'(x)}.$$

П р и м е р ы.

1) $\lim\limits_{x\to 0}\frac{1-\cos x}{x^2} = \lim\limits_{x\to 0}\frac{\sin x}{2x} = \frac{1}{2}$.

2) Следующее предельное значение вычисляется двукратным применением правила Лопиталя:

$$\lim_{x\to 0}\frac{x-\sin x}{x^3} = \lim_{x\to 0}\frac{1-\cos x}{3x^2} = \lim_{x\to 0}\frac{\sin x}{6x} = \frac{1}{6}.$$

3) Трехкратным применением правила Лопиталя вычисляется предельное значение

$$\lim_{x\to 0}\frac{x^4}{x^2+2\cos x-2} = \lim_{x\to 0}\frac{4x^3}{2x-2\sin x} = \lim_{x\to 0}\frac{12x^2}{2-2\cos x} = \lim_{x\to 0}\frac{24x}{2\sin x} = 12.$$

2. Раскрытие неопределенности вида $\frac{\infty}{\infty}$. Будем говорить, что отношение двух функций $\frac{f(x)}{g(x)}$ представляет собой при $x \to a$ неопределенность вида $\frac{\infty}{\infty}$, если

$$\lim_{x\to a} f(x) = \lim_{x\to a} g(x) = \infty \text{ [1]}. \qquad (8.28)$$

[1] Вместо ∞ можно брать $+\infty$ или $-\infty$.

Для раскрытия этой неопределенности, т. е. для вычисления предельного значения $\lim\limits_{x\to a}\dfrac{f(x)}{g(x)}$, справедливо утверждение, совершенно аналогичное теореме 8.17, а именно: *если в формулировке теоремы* 8.17 *заменить требование* $\lim\limits_{x\to 0} f(x) = \lim\limits_{x\to a} g(x) = 0$ *на условие* (8.28), *то теорема* 8.17 *останется справедливой.*

Для доказательства рассмотрим *произвольную* последовательность $\{x_n\}$ значений аргумента, сходящуюся к a справа (или слева). Пусть x_m и x_n — любые два элемента этой последовательности с достаточно большими номерами m и n, удовлетворяющими условию $n > m$.

Применяя формулу Коши (8.19) по сегменту $[x_m, x_n]$, мы можем утверждать, что на этом сегменте найдется точка ξ_{mn} такая, что

$$\frac{f(x_n)-f(x_m)}{g(x_n)-g(x_m)} = \frac{f(x_n)}{g(x_n)}\,\frac{1-\dfrac{f(x_m)}{f(x_n)}}{1-\dfrac{g(x_m)}{g(x_n)}} = \frac{f'(\xi_{mn})}{g'(\xi_{mn})}.$$

Отсюда

$$\frac{f(x_n)}{g(x_n)} = \frac{f'(\xi_{mn})}{g'(\xi_{mn})}\,\frac{1-\dfrac{g(x_m)}{g(x_n)}}{1-\dfrac{f(x_m)}{f(x_n)}}.$$

Если существует $\lim\limits_{x\to a}\dfrac{f'(x)}{g'(x)} = A$, то *для любого* $\varepsilon > 0$ можно фиксировать номер m столь большим, что при любом $n > m$ дробь $\dfrac{f'(\xi_{mn})}{g'(\xi_{mn})}$ будет отклоняться от числа A меньше чем на $\varepsilon/2$. Далее, учитывая (8.28), мы можем для данного фиксированного m найти номер n_0 такой, что при $n \geqslant n_0$ дробь

$$\frac{1-\dfrac{g(x_m)}{g(x_n)}}{1-\dfrac{f(x_m)}{f(x_n)}}$$

будет отклоняться от единицы меньше чем на $\dfrac{\varepsilon/2}{|A|+\varepsilon/2}$. Но тогда при $n \geqslant n_0$ дробь $\dfrac{f(x_n)}{g(x_n)}$ будет отклоняться от числа A меньше чем на $\dfrac{\varepsilon}{2} + |A|\dfrac{\varepsilon/2}{|A|+\varepsilon/2} + \dfrac{\varepsilon}{2}\,\dfrac{\varepsilon/2}{|A|+\varepsilon/2} = \varepsilon$. А это означает, что предельное значение $\lim\limits_{x\to a}\dfrac{f(x)}{g(x)}$ существует и равно A.

Примеры. 1) $\lim\limits_{x\to 0+0}\sqrt{x}\ln x = \lim\limits_{x\to 0+0}\dfrac{\ln x}{x^{-1/2}} = \lim\limits_{x\to 0+0}\dfrac{1/x}{(-1/2)\,x^{-3/2}} = -2\lim\limits_{x\to 0+0}\sqrt{x} = 0.$

2) n-кратным применением правила Лопиталя вычисляется предельное значение

$$\lim_{x\to+\infty}\frac{x^n}{e^x}=\lim_{x\to+\infty}\frac{nx^{n-1}}{e^x}=\lim_{x\to+\infty}\frac{n(n-1)x^{n-2}}{e^x}=\ldots$$
$$\ldots=\lim_{x\to+\infty}\frac{n!}{e^x}=0.$$

3. Раскрытие неопределенностей других видов. Кроме изученных выше неопределенностей видов $\frac{0}{0}$ и $\frac{\infty}{\infty}$, часто встречаются неопределенности следующих видов: $0\cdot\infty$, $\infty-\infty$, 1^∞, 0^0, ∞^0.

Все эти неопределенности сводятся к изученным выше двум неопределенностям путем алгебраических преобразований. Покажем это, например, по отношению к *последним трем* из указанных выше неопределенностей. Каждая из этих неопределенностей имеет вид

$$y=f(x)^{g(x)},\tag{8.29}$$

где при $x\to a$ $f(x)$ стремится соответственно к 1, 0 или ∞, а $g(x)$ стремится соответственно к ∞, 0 или 0. Логарифмируя выражение (8.29), получим (считая, что $f(x)>0$)

$$\ln y=g(x)\ln f(x).\tag{8.30}$$

Для нахождения предельного значения выражения (8.29) достаточно найти предельное значение выражения (8.30).

Заметим, что в любом из трех рассматриваемых случаев выражение (8.30) представляет собой при $x\to\infty$ неопределенность вида $0\cdot\infty$. Стало быть, достаточно научиться сводить неопределенность вида $0\cdot\infty$ к неопределенности вида $\frac{0}{0}$ или $\frac{\infty}{\infty}$. Покажем, как это делается. Итак, пусть

$$z=\varphi(x)\cdot\psi(x),\tag{8.31}$$

причем

$$\lim_{x\to a}\varphi(x)=0,\qquad \lim_{x\to a}\psi(x)=\pm\infty.$$

Перепишем (8.31) в виде

$$z=\varphi(x)\cdot\psi(x)=\frac{\varphi(x)}{\dfrac{1}{\psi(x)}}.\tag{8.32}$$

Очевидно, выражение (8.32) представляет собой при $x\to a$ неопределенность вида $\frac{0}{0}$. Наша цель достигнута.

Примеры. 1) Вычислить $\lim\limits_{x\to0+0}x^x$. Обозначим $y=x^x$. Тогда $\ln y=x\ln x=\frac{\ln x}{1/x}$. Применяя правило Лопиталя, будем

иметь

$$\lim_{x\to 0+0}(\ln y) = \lim_{x\to 0+0}\frac{\ln x}{1/x} = \lim_{x\to 0+0}\frac{1/x}{-1/x^2} = -\lim_{x\to 0+0} x = 0.$$

Отсюда ясно, что $\lim\limits_{x\to 0+0} y = 1$.

2) $\lim\limits_{x\to 0}(1+x^2)^{\frac{1}{e^x-1-x}}$. Пусть $y = (1+x^2)^{\frac{1}{e^x-1-x}}$. Тогда

$$\ln y = \frac{1}{(e^x-1-x)}\cdot\ln(1+x^2).$$

Пользуясь правилом Лопиталя, получим

$$\lim_{x\to 0}\ln y = \lim_{x\to 0}\frac{\ln(1+x^2)}{e^x-1-x} = \lim_{x\to 0}\frac{\frac{2x}{1+x^2}}{e^x-1} = \lim_{x\to 0}\frac{2x}{(e^x-1)(1+x^2)} = \\ = \lim_{x\to 0}\frac{2}{e^x(1+x^2)+(e^x-1)2x} = 2.$$

Отсюда ясно, что $\lim\limits_{x\to 0} y = e^2$.

§ 13. Формула Тейлора

Устанавливаемая в этом параграфе формула является одной из основных формул математического анализа и имеет многочисленные приложения как в анализе, так и в смежных дисциплинах.

Теорема 8.18 (теорема Тейлора[1]). *Пусть функция $f(x)$ имеет в некоторой окрестности точки a производную порядка $n+1$ (n — любой фиксированный номер)[2]. Пусть, далее, x — любое значение аргумента из указанной окрестности, p — произвольное положительное число. Тогда между точками a и x найдется точка ξ такая, что справедлива следующая формула:*

$$f(x) = f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(x-a) + \frac{f^{(2)}(a)}{2!}(x-a)^2 + \ldots \\ \ldots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(x-a)^n + R_{n+1}(x), \quad (8.33)$$

где[3]

$$R_{n+1} = \left(\frac{x-a}{x-\xi}\right)^p \frac{(x-\xi)^{n+1}}{n!p} f^{(n+1)}(\xi). \quad (8.34)$$

---

[1]) Брук Тейлор — английский математик (1685–1731).

[2]) Отсюда вытекает, что *сама функция $f(x)$ и ее производные до порядка n непрерывны в указанной окрестности точки a.*

[3]) Так как ξ лежит между x и a, то $\dfrac{x-a}{x-\xi} > 0$, так что выражение $\left(\dfrac{x-a}{x-\xi}\right) p$ определено для любого $p > 0$.

Формула (8.33) называется *формулой Тейлора* (с центром в точке a), а выражение $R_{n+1}(x)$ называется *остаточным членом.* Как мы увидим ниже, остаточный член может быть записан не только в виде (8.34), но и в других видах. Принято называть остаточный член, записанный в виде (8.34), *остаточным членом в общей форме*[1]).

Доказательство. Обозначим символом $\varphi(x, a)$ многочлен относительно x порядка n, фигурирующий в правой части (8.33), т. е. положим

$$\varphi(x,a) = f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(x-a) + \frac{f^{(2)}(a)}{2!}(x-a)^2 + \ldots \\ \ldots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(x-a)^n. \quad (8.35)$$

Далее обозначим символом $R_{n+1}(x)$ разность

$$R_{n+1}(x) = f(x) - \varphi(x,a). \quad (8.36)$$

Теорема будет доказана, если мы установим, что $R_{n+1}(x)$ определяется формулой (8.34).

Фиксируем любое значение x из окрестности, указанной в формулировке теоремы. Ради определенности будем считать, что $x > a$. Обозначим через t переменную величину, имеющую областью своего изменения сегмент $[a, x]$, и рассмотрим вспомогательную функцию $\psi(t)$ следующего вида:

$$\psi(t) = f(x) - \varphi(x,t) - (x-t)^p Q(x), \quad (8.37)$$

где

$$Q(x) = \frac{R_{n+1}(x)}{(x-a)^p}. \quad (8.38)$$

Подробнее $\psi(t)$ можно записать так:

$$\psi(t) = f(x) - f(t) - \frac{f'(t)}{1!}(x-t) - \ldots \\ \ldots - \frac{f^{(n)}(t)}{n!}(x-t)^n - (x-t)^p Q(x). \quad (8.39)$$

Наша цель — выразить $Q(x)$, исходя из свойств введенной нами функции $\psi(t)$.

Покажем, что функция $\psi(t)$ удовлетворяет на сегменте $[a, x]$ всем условиям теоремы 8.11 (Ролля).

Из формулы (8.39) и из условий, наложенных на функцию $f(x)$, очевидно, что функция $\psi(t)$ непрерывна на сегменте $[a, x]$

[1]) Эту форму остаточного члена называют также формой Шлемильха–Роша.

и дифференцируема на этом сегменте [1]). Убедимся в том, что $\psi(a) = \psi(x) = 0$. Полагая в (8.37) $t = a$ и принимая во внимание равенство (8.38), будем иметь

$$\psi(a) = f(x) - \varphi(x, a) - R_{n+1}(x).$$

Отсюда на основании (8.36) получим $\psi(a) = 0$. Равенство $\psi(x) = 0$ сразу вытекает из формулы (8.39).

Итак, для функции $\psi(t)$ на сегменте $[a, x]$ выполнены все условия теоремы 8.11 (Ролля). На основании этой теоремы внутри сегмента $[a, x]$ найдется точка ξ такая, что

$$\psi'(\xi) = 0. \tag{8.40}$$

Подсчитаем производную $\psi'(t)$. Дифференцируя равенство (8.39), будем иметь

$$\psi'(t) = -f'(t) + \frac{f'(t)}{1!} - \frac{f^{(2)}(t)}{1!}(x - t) + \frac{f^{(2)}(t)}{2!}2(x - t) - \ldots$$
$$\ldots + \frac{f^{n}(t)}{n!}n(x-t)^{n-1} - \frac{f^{(n+1)}(t)}{n!}(x-t)^{n} + p(x-t)^{p-1}Q(x). \tag{8.41}$$

Легко видеть, что все члены в правой части (8.41), за исключением последних двух, взаимно уничтожаются. Таким образом,

$$\psi'(t) = -\frac{f^{(n+1)}(t)}{n!}(x - t)^{n} + p(x - t)^{p-1}Q(x). \tag{8.42}$$

Полагая в формуле (8.42) $t = \xi$ и используя равенство (8.40), получим

$$Q(x) = \frac{(x - \xi)^{n-p+1}}{n!p}f^{(n+1)}(\xi). \tag{8.43}$$

Сопоставляя (8.43) и (8.38), окончательно будем иметь

$$R_{n+1}(x) = (x - a)^{p}Q(x) = \frac{(x - a)^{p}(x - \xi)^{n-p+1}}{n!p}f^{(n+1)}(\xi).$$

Теорема доказана.

Найдем разложение по формуле Тейлора простейшей функции — *алгебраического многочлена n-го порядка*. Пусть

$$f(x) = C_0x^{n} + C_1x^{n-1} + \ldots + C_{n-1}x + C_n.$$

Тогда, поскольку $f^{(n+1)}(x) \equiv 0$, остаточный член $R_{n+1}(x) \equiv 0$ и формула Тейлора (8.33) принимает вид

$$f(x) = f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(x - a) + \frac{f^{(2)}(a)}{2!}(x - a)^2 + \ldots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(x - a)^{n}. \tag{8.44}$$

[1]) Функция $f(t)$ и ее производные до порядка n непрерывны на сегменте $[a, x]$, а $f^{(n+1)}(t)$ существует и конечна на этом сегменте (см. сноску [3]) на с. 275).

(Здесь в качестве a можно взять любую точку бесконечной прямой.) Таким образом, формула Тейлора позволяет представить любой многочлен $f(x)$ *в виде многочлена по степеням* $(x-a)$, где a — любое вещественное число.

Пусть теперь $f(x)$ — *произвольная функция*, удовлетворяющая условиям теоремы 8.18. Постараемся выяснить, какими свойствами обладает многочлен (8.35), фигурирующий в формуле Тейлора для этой функции. Как и выше, будем обозначать этот многочлен символом $\varphi(x,a)$. Символом $\varphi^{(n)}(x,a)$ обозначим n-ю производную $\varphi(x,a)$ по x. Дифференцируя формулу (8.35) по x и затем полагая $x=a$, мы получим следующие равенства:

$$\begin{gathered}\varphi(a,a)=f(a),\\ \varphi'(a,a)=f'(a),\\ \varphi^{(2)}(a,a)=f^{(2)}(a),\\ \dots\dots\dots\dots\\ \varphi^{(n)}(a,a)=f^{(n)}(a).\end{gathered}$$

Таким образом, фигурирующий в формуле Тейлора для произвольной функции $f(x)$ многочлен $\varphi(x,a)$ обладает следующим свойством: он сам и его производные до порядка n включительно равны в точке $x=a$ соответственно $f(x)$ и ее производным до порядка n.

§ 14. Различные формы остаточного члена. Формула Маклорена

1. Остаточный член в форме Лагранжа, Коши и Пеано. Выше мы установили формулу Тейлора с остаточным членом *в общей форме*. Здесь мы установим другие возможные представления для остаточного члена. Два из этих представлений мы получим в качестве частных случаев из общей формы остаточного члена.

Прежде всего несколько преобразуем формулу для остаточного члена (8.34). Поскольку точка ξ лежит между точками a и x, *найдется такое число* θ [1]) *из интервала* $0<\theta<1$, что $\xi-a=\theta(x-a)$. При этом $\xi=a+\theta(x-a)$, $x-\xi=(x-a)(1-\theta)$. Таким образом, формула (8.34) может быть переписана в виде

$$R_{n+1}(x)=\frac{(x-a)^{n+1}(1-\theta)^{n-p+1}}{n!p}f^{(n+1)}[a+\theta(x-a)]. \qquad (8.45)$$

Рассмотрим теперь два важных частных случая формулы (8.45):

[1]) Следует подчеркнуть, что ξ, а стало быть, и θ зависят не только от x и n, но также и от p.

1) $p = n+1$; 2) $p = 1$ (напомним, что в формулах (8.34) и (8.45) в качестве p может быть взято любое положительное число). Первый из этих частных случаев ($p = n+1$) приводит нас к остаточному члену *в форме Лагранжа*

$$R_{n+1}(x) = \frac{(x-a)^{n+1}}{(n+1)!} f^{(n+1)}[a + \theta(x-a)]. \tag{8.46}$$

Эта форма остаточного члена наиболее употребительна в приложениях. Остаточный член в форме Лагранжа напоминает следующий, очередной член формулы Тейлора, лишь только $(n+1)$-я производная функции $f(t)$ вычисляется не в точке a, а в некоторой промежуточной между a и x точке $\xi = a + \theta(x-a)$. Второй из указанных выше частных случаев ($p = 1$) приводит нас к остаточному члену *в форме Коши*

$$R_{n+1}(x) = \frac{(x-a)^{n+1}(1-\theta)^n}{n!} f^{(n+1)}[a + \theta(x-a)]. \tag{8.47}$$

Так как формы Лагранжа и Коши отвечают разным значениям p, а θ зависит от p, то значения θ в формулах (8.46) и (8.47) являются, вообще говоря, *различными*. Для оценки некоторых функций форма Коши является более предпочтительной, чем форма Лагранжа. Обе формы остаточного члена (Лагранжа и Коши) обычно используются в тех случаях, когда требуется при тех или иных фиксированных значениях x, отличных от a, *приближенно вычислить функцию* $f(x)$.

Естественно приближенно заменить $f(x)$ многочленом $\varphi(x, a)$ и численно оценить сделанную при этом ошибку. Наряду с этим встречаются задачи, в которых нас интересует не численная величина указанной ошибки, а *лишь порядок ее относительно малой величины* $(x-a)$. Для этой цели удобна другая форма записи остаточного члена (так называемая *форма Пеано*[1]), к установлению которой мы и переходим.

Пусть функция $f(x)$ имеет производные до порядка $(n-1)$ в некоторой окрестности точки a и производную порядка n в самой точке a.

Обозначим, как и выше, символом $R_{n+1}(x)$ разность функции $f(x)$ и многочлена (8.35) и докажем, что для $R_{n+1}(x)$ справедливо следующее равенство

$$R_{n+1}(x) = o[(x-a)^n]. \tag{8.48}$$

Это последнее равенство и называют остаточным членом, представленным *в форме Пеано.*

Так как при сделанных нами предположениях многочлен (8.35) и его производные до порядка n включительно совпадают

---

[1] Джузеппе Пеано — итальянский математик (1858–1932).

в точке $x = a$ соответственно с функцией $f(x)$ и ее производными, взятыми в той же точке $x = a$, то справедливы равенства

$$R_{n+1}(a) = 0,\ R'_{n+1}(a) = 0,\ \ldots,\ R^{(n-1)}_{n+1}(a) = 0,\ R^{(n)}_{n+1}(a) = 0, \tag{8.49}$$

и нам остается доказать, что из равенств (8.49) вытекает представление (8.48).

Для этого достаточно с помощью равенств (8.49) доказать, что

$$\lim_{x\to a} \frac{R_{n+1}(x)}{(x-a)^n} = 0. \tag{8.50}$$

Так как каждая из функций $R_{n+1}(x)$ и $(x-a)^n$ дифференцируема $(n-1)$ раз всюду в некоторой окрестности точки a, справедливы равенства (8.49) и любая производная функции $(x-a)^n$ до порядка $(n-1)$ включительно обращается в нуль *только в точке* a, то для раскрытия неопределенности, стоящей в левой части (8.50), можно $(n-1)$ раз последовательно применять теорему Лопиталя 8.17, в результате чего мы получим

$$\lim_{x\to a} \frac{R_{n+1}(x)}{(x-a)^n} = \lim_{x\to a} \frac{R'_{n+1}(x)}{n\cdot(x-a)^{n-1}} = \ldots = \lim_{x\to a} \frac{R^{(n-1)}_{n+1}(x)}{n!(x-a)}. \tag{8.51}$$

Учитывая предпоследнее равенство (8.49), мы можем переписать (8.51) в виде

$$\lim_{x\to a} \frac{R_{n+1}(x)}{(x-a)^n} = \frac{1}{n!} \lim_{x\to a} \frac{R^{(n-1)}_{n+1}(x) - R^{(n-1)}_{n+1}(a)}{x-a}.$$

Так как производная $R^{(n)}_{n+1}(a)$ существует и в силу последнего соотношения (8.49) равна нулю, то предельное значение в правой части последнего равенства существует и равно нулю, что и завершает доказательство равенства (8.50).

Тем самым вывод представления (8.48) завершен.

В заключение запишем полностью формулу Тейлора с остаточным членом в форме Пеано

$$f(x) = f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(x-a) + \ldots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(x-a)^n + o[(x-a)^n]. \tag{8.52}$$

2. Другая запись формулы Тейлора. Часто записывают формулу Тейлора (8.33) в несколько ином виде. Положим в (8.33) $a = x_0$, $(x-a) = \Delta x$ и возьмем остаточный член в форме Лагранжа (8.46). При этом $x = x_0 + \Delta x$, и мы получим

$$f(x_0 + \Delta x) - f(x_0) = \frac{f'(x_0)}{1!}\Delta x + \frac{f^{(2)}(x_0)}{2!}(\Delta x)^2 + \ldots$$
$$\ldots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}(\Delta x)^n + \frac{f^{(n+1)}(x_0 + \theta\Delta x)}{(n+1)!}(\Delta x)^{n+1}. \tag{8.53}$$

(Здесь θ — некоторое число из интервала $0 < \theta < 1$.) Формула Тейлора (8.53) является естественным обобщением формулы Лагранжа (8.11) (см. § 9). Формула Лагранжа (8.11) получается из формулы (8.53) в частном случае $n = 0$.

3. Формула Маклорена. Принято называть *формулой Маклорена*[1]) формулу Тейлора (8.33) с центром в точке $a = 0$. Таким образом, формула Маклорена дает представление функции в окрестности точки $x = 0$. Запишем формулу Маклорена для произвольной функции $f(x)$ с остаточным членом в форме Лагранжа, Коши и Пеано[2]):

$$f(x) = f(0) + \frac{f'(0)}{1!}x + \frac{f^{(2)}(0)}{2!}x^2 + \ldots + \frac{f^{(n)}(0)}{n!}x^n + R_{n+1}(x), \quad (8.54)$$

где остаточный член имеет вид:

1) в форме Лагранжа

$$R_{n+1}(x) = \frac{x^{n+1}}{(n+1)!}f^{(n+1)}(\theta x) \quad (0 < \theta < 1); \quad (8.55)$$

2) в форме Коши[3])

$$R_{n+1}(x) = \frac{x^{n+1}(1-\theta)^n}{n!}f^{(n+1)}(\theta x) \quad (0 < \theta < 1); \quad (8.56)$$

3) в форме Пеано

$$R_{n+1}(x) = o(x^n). \quad (8.57)$$

(Мы использовали формулы (8.46), (8.47) и (8.48).)

Перейдем к оценке остаточного члена в формуле Тейлора–Маклорена, к отысканию разложения по формуле Маклорена важнейших элементарных функций и к рассмотрению различных приложений этой формулы.

§ 15. Оценка остаточного члена. Разложение некоторых элементарных функций

1. Оценка остаточного члена для произвольной функции. Оценим для произвольной функции $f(x)$ остаточный член в формуле Маклорена (8.54), взятый в форме Лагранжа (8.55).

---

[1]) Колин Маклорен — английский математик (1698–1746).

[2]) При этом предполагается, что $f(x)$ имеет в окрестности точки $x = 0$ $(n+1)$-ю производную, а для остаточного члена в форме Пеано — в окрестности точки $x = 0$ $(n-1)$-ю производную, а в самой точке $x = 0$ n-ю производную.

[3]) Еще раз подчеркнем, что значения θ в формулах (8.55) и (8.56), вообще говоря, различны.

Предположим, что рассматриваемая нами функция $f(x)$ обладает следующим свойством: *существует такое вещественное число M, что для всех номеров n и для всех значений аргумента x из рассматриваемой окрестности точки $x = 0$ справедливо неравенство*

$$|f^{(n)}(x)| \leqslant M. \tag{8.58}$$

Функцию, обладающую указанным свойством, будем называть *функцией, совокупность всех производных которой ограничена в окрестности точки $x = 0$.*

Из неравенства (8.58) вытекает, что

$$|f^{(n)}(\theta x)| \leqslant M, \tag{8.59}$$

и поэтому из формулы (8.55) следует, что

$$|R_{n+1}(x)| = \frac{|x|^{n+1}}{(n+1)!}|f^{(n+1)}(\theta x)| \leqslant M\frac{|x|^{n+1}}{(n+1)!}.$$

Итак, *мы получаем следующую универсальную оценку остаточного члена для функции, совокупность всех производных которой ограничена числом M в окрестности точки $x = 0$:*

$$|R_{n+1}(x)| \leqslant M\frac{|x|^{n+1}}{(n+1)!}. \tag{8.60}$$

Напомним, что при любом фиксированном x

$$\lim_{n\to\infty} \frac{|x|^{n+1}}{(n+1)!} = 0$$

(см. пример 3 п. 3 § 3 гл. 3). Отсюда вытекает, что, выбирая достаточно большой номер n, мы можем сделать правую часть (8.60) как угодно малой. Это дает нам возможность применять формулу Маклорена для приближенного вычисления функций, обладающих указанным свойством, с любой наперед заданной точностью. Приведем примеры функций, совокупность всех производных которых ограничена в окрестности точки $x = 0$:

1) $f(x) = e^x$, $f^{(n)}(x) = e^x$. Совокупность всех производных этой функции ограничена на любом сегменте $[-r, r]$ $(r > 0)$ числом $M = e^r$.

2) $f(x) = \cos x$ или $f(x) = \sin x$. Совокупность всех производных каждой из этих функций ограничена всюду на бесконечной прямой числом $M = 1$.

2. Разложение по формуле Маклорена некоторых элементарных функций.

А. $f(x) = e^x$. Поскольку $f^{(n)}(x) = e^x$, $f^{(n)}(0) = 1$ для любого n, формула Маклорена (8.54) имеет вид

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \ldots + \frac{x^n}{n!} + R_{n+1}(x), \tag{8.61}$$

где остаточный член в форме Лагранжа равен

$$R_{n+1}(x) = \frac{x^{n+1}}{(n+1)!}\, e^{\theta x} \qquad (0 < \theta < 1).$$

На любом сегменте $[-r, +r]$ $(r > 0)$, в силу того, что $|e^{\theta x}| < e^r$, получим следующую оценку для остаточного члена:

$$|R_{n+1}(x)| < \frac{r^{n+1}}{(n+1)!} e^r. \tag{8.62}$$

Б. $f(x) = \sin x$. Поскольку $f^{(n)}(x) = \sin\left(x + n\frac{\pi}{2}\right)$,

$$f^{(n)}(0) = \sin n\frac{\pi}{2} = \begin{cases} 0 & \text{при четном } n, \\ (-1)^{\frac{n-1}{2}} & \text{при нечетном } n, \end{cases}$$

формула Маклорена (8.54) имеет вид

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \ldots + (-1)^{\frac{n-1}{2}} \frac{x^n}{n!} + R_{n+2}(x), \tag{8.63}$$

где n — нечетное число, а остаточный член в форме Лагранжа равен

$$R_{n+2}(x) = \frac{x^{n+2}}{(n+2)!} \sin\left(\theta x + n\frac{\pi}{2} + \pi\right) \quad (0 < \theta < 1).$$

Очевидно, что на любом сегменте $[-r, +r]$ $(r > 0)$ для остаточного члена справедлива следующая оценка:

$$|R_{n+2}(x)| \leqslant \frac{r^{n+2}}{(n+2)!}. \tag{8.64}$$

В. $f(x) = \cos x$. Поскольку $f^{(n)}(x) = \cos\left(x + n\frac{\pi}{2}\right)$,

$$f^{(n)}(0) = \cos n\frac{\pi}{2} = \begin{cases} 0 & \text{при нечетном } n, \\ (-1)^{\frac{n}{2}} & \text{при четном } n, \end{cases}$$

формула Маклорена (8.54) имеет вид

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \ldots + (-1)^{\frac{n}{2}} \frac{x^n}{n!} + R_{n+2}(x), \tag{8.65}$$

где n — четное число, а остаточный член в форме Лагранжа равен

$$R_{n+2}(x) = \frac{x^{n+2}}{(n+2)!} \cos\left(\theta x + n\frac{\pi}{2} + \pi\right) \quad (0 < \theta < 1).$$

На любом сегменте $[-r, +r]$ $(r > 0)$ получаем для остаточного члена оценку (8.64).

Г. $f(x) = \ln(1+x)$. Поскольку при $n \geqslant 1$

$$f^{(n)}(x) = (-1)^{n-1}\frac{(n-1)!}{(1+x)^n},\ f(0) = 0,\ f^{(n)}(0) = (-1)^{n-1}(n-1)!,$$

формула Маклорена (8.54) имеет вид

$$\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \ldots + (-1)^{n-1}\frac{x^n}{n} + R_{n+1}(x). \quad (8.66)$$

Остаточный член на этот раз запишем и оценим и *в форме Лагранжа, и в форме Коши*:

$$R_{n+1}(x) = \frac{(-1)^n x^{n+1}}{(n+1)(1+\theta x)^{n+1}} \text{ (в форме Лагранжа)}, \quad (8.67)$$

$$R_{n+1}(x) = (-1)^n x^{n+1}\frac{(1-\theta)^n}{(1+\theta x)^{n+1}} \text{ [1] (в форме Коши)}. \quad (8.68)$$

Для оценки функции $\ln(1+x)$ для значений x, принадлежащих сегменту $0 \leqslant x \leqslant 1$, удобнее исходить из остаточного члена в форме Лагранжа (8.67). Переходя в формуле (8.67) к модулям, получим для всех x из сегмента $0 \leqslant x \leqslant 1$

$$|R_{n+1}(x)| < \frac{1}{n+1}. \quad (8.69)$$

Из оценки (8.69) очевидно, что для всех x из сегмента $0 \leqslant x \leqslant 1$ $R_{n+1}(x) \to 0$ при $n \to \infty$.

Оценим теперь функцию $\ln(1+x)$ для *отрицательных* значений x из сегмента $-r \leqslant x \leqslant 0$, где $0 < r < 1$. Для этого будем исходить из остаточного члена в форме Коши (8.68).

Перепишем этот остаточный член в виде

$$R_{n+1}(x) = (-1)^n \left(\frac{1-\theta}{1+\theta x}\right)^n \frac{x^{n+1}}{1+\theta x}. \quad (8.70)$$

Принимая во внимание, что для рассматриваемых значений x $\dfrac{1-\theta}{1+\theta x} < 1$, и переходя в формуле (8.70) к модулям, будем иметь

$$|R_{n+1}(x)| < \frac{r^{n+1}}{1-r}. \quad (8.71)$$

Так как $0 < r < 1$, то оценка (8.71) позволяет утверждать, что $\lim\limits_{n\to\infty} R_{n+1} = 0$.

---

[1] Еще раз отметим, что в формулах (8.67) и (8.68) значения θ являются, вообще говоря, различными.

Д. $f(x) = (1+x)^\alpha$, где α — вещественное число. Поскольку

$$f^{(n)}(x) = \alpha(\alpha-1)\dots(\alpha-n+1)(1+x)^{\alpha-n},$$
$$f^{(n)}(0) = \alpha(\alpha-1)\dots(\alpha-n+1),$$

формула Маклорена (8.54) имеет вид

$$(1+x)^\alpha = 1 + \frac{\alpha}{1!}x + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2!}x^2 + \dots \\ \dots + \frac{\alpha(\alpha-1)\dots(\alpha-n+1)}{n!}x^n + R_{n+1}(x), \qquad (8.72)$$

где остаточный член в форме Лагранжа равен

$$R_{n+1}(x) = \frac{\alpha(\alpha-1)\dots(\alpha-n)}{(n+1!)}(1+\theta x)^{\alpha-(n+1)}x^{n+1} \quad (0<\theta<1). \qquad (8.73)$$

В частном случае, когда $a = n$ — целое число, $R_{n+1}(x) = 0$, и мы получим известную из элементарного курса формулу бинома Ньютона

$$(1+x)^n = 1 + \frac{n}{1!}x + \frac{n(n-1)}{2!}x^2 + \dots + x^n. \qquad (8.74)$$

Если нужно получить разложение не двучлена $(1+x)^n$, а двучлена $(a+x)^n$, то можно вынести a^n за скобку и воспользоваться формулой (8.74). При этом получим

$$(a+x)^n = a^n\left(1+\frac{x}{a}\right)^n = a^n\left[1+\frac{n}{1!}\left(\frac{x}{a}\right)+\frac{n(n-1)}{2!}\left(\frac{x}{a}\right)^2+\dots+\left(\frac{x}{a}\right)^n\right].$$

Таким образом, общий случай бинома Ньютона является частным случаем формулы Маклорена.

Е. $f(x) = \operatorname{arctg} x$. Можно убедиться в том, что

$$f^{(n)}(0) = \begin{cases} 0 & \text{при четном } n, \\ (-1)^{\frac{n-1}{2}}(n-1)! & \text{при нечетном } n. \end{cases}$$

Таким образом, формула Маклорена (8.54) с остаточным членом в форме Пеано (8.57) имеет вид

$$\operatorname{arctg} x = x - \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} - \frac{x^7}{7} + \dots + (-1)^{\frac{n-1}{2}}\frac{x^n}{n} + o(x^n).$$

(Здесь n — нечетное число.)

§ 16. Примеры приложений формулы Маклорена

1. Алгоритм вычисления числа e. В п. 4 § 3 гл. 3 мы ввели число e как предел $\lim\limits_{n\to\infty}\left(1+\frac{1}{n}\right)^n$ и получили для e грубую

оценку (см. формулу (3.7) из гл. 3) $2 \leqslant e \leqslant 3$. Теперь мы укажем, как вычислить число e с любой интересующей нас степенью точности. Воспользуемся формулой Маклорена (8.61) и оценкой остаточного члена (8.62), положив в этих формулах $x = r = 1$. Получим

$$e = 1 + \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} + \ldots + \frac{1}{n!} + R_{n+1}(1), \tag{8.75}$$

где

$$|R_{n+1}(1)| < \frac{e}{(n+1)!} \leqslant \frac{3}{(n+1)!}. \tag{8.76}$$

Выбирая в формулах (8.75) и (8.76) достаточно большое n, мы можем оценить с помощью этих формул число e с любой интересующей нас степенью точности.

2. Реализация алгоритма вычисления числа *e* на электронной машине. Указанный в предыдущем пункте алгоритм вычисления числа e легко реализуется на электронно-вычислительных машинах.

Мы приведем результат вычисления числа e по формуле (8.75) при $n = 400$ на электронно-вычислительной машине БЭСМ-6 [1]). Вычисления велись с 600 знаками после запятой.

---

[1]) Для читателей, знакомых со стандартным алгоритмическим языком АЛГОЛ, приведем записанную на этом языке программу вычислений:

Система Алгол–БЭСМ6, вариант 10–12–69

```
begin integer i, c, p, n, m; integer array a, b, e [0 : 601];
  m : = 400; marg (39, 50, 39, 10, 0, 0);
  e [0] : = 1; b [0] : = 1;
  for i : = 1 step 1 until 601 do
    a [i] : = b [i] : = e [i] : = 0;
  for n : = 1 step 1 until m do
begin for i : = 0 step 1 until 600 do
    a [i] : = b [i]; c : = a [0];
    for i = 0 step 1 until 600 do
    begin b [i] : = c ÷ n;
      c : = (c − n) × b[i] × 10 + a[i + 1] end
    p : = 0
    for i : 600 step − 1 until 0 do
    begin c : = e[i] + b[i] + p;
      p : = 0
      if c < 10 then e [i] : = c else
      begin e [i] : = c − 10; p : = 1 end
    end
  end
  for n : = 1 step 1 until 6 do
  begin output ('10/', 'zd.', e[0]);
      for i : = 1 step 1 until 590 do
      output ('zd', e[i])
  end
end
```

Учитывая возможные ошибки округления, мы отбросили последние 10 знаков и приводим результат вычисления с 590 знаками после запятой:

2,718281 828459 045235 360287 471352 662497 757247 093699 959574 966967 627724 076630 353547 594571 382178 525166 427427 466391 932003 059921 817413 596629 043572 900334 295260 595630 738132 328627 943490 763233 829880 753195 251019 011573 834187 930702 154089 149934 884167 509244 761460 668082 264800 168477 411853 742345 442437 107539 077744 992069 551702 761838 606261 331384 583000 752044 933826 560297 606737 113200 709328 709127 443747 047230 696977 209310 141692 836819 025515 108657 463772 111252 389784 425056 953696 770785 449969 967946 864454 905987 931636 889230 098793 127736 178215 424999 229576 351482 208269 895193 668033 182528 869398 496465 105820 939239 829488 793320 36 ...

Отметим, что на проведение всех вычислений ушло около одной минуты машинного времени.

3. Использование формулы Маклорена для асимптотических[1]) оценок элементарных функций и вычисления пределов. Формула Маклорена является мощным средством для получения асимптотических оценок элементарных функций и вычисления пределов.

В гл. 4 мы установили следующие асимптотические формулы для элементарных функций:

$$\begin{aligned} \sin x &= x + o(x), \\ \sqrt[n]{1+x} &= 1 + \frac{x}{n} + o(x), \\ \ln(1+x) &= x + o(x), \\ e^x &= 1 + x + o(x), \\ \cos x &= 1 - \frac{x^2}{2} + o(x^2). \end{aligned} \tag{8.77}$$

Формулы (8.77) дают представление элементарных функций при малых значениях $|x|$. Первые четыре из формул (8.77) оценивают соответствующие элементарные функции с точностью до членов 1-*го порядка* относительно малой величины x, а последняя из формул (8.77) — с точностью до членов 2-*го порядка* относительно x.

Оценок (8.77) оказывается достаточно для вычисления простейших пределов. Однако для вычисления более сложных пределов, в которых определяющую роль играют члены более высокого порядка относительно малой величины x, формул (8.77)

---

[1]) Формулу или оценку, характеризующую поведение $f(x)$ при $x \to a$ (здесь при $x \to 0$), называют *асимптотической*.

оказывается уже недостаточно. Так, например, при помощи формул (8.77) невозможно вычислить предельное значение

$$\lim_{x\to 0} \frac{\sin x - x}{x^3}, \tag{8.78}$$

ибо по виду знаменателя можно заключить, что здесь определяющую роль играют члены 3-*го порядка* относительно x.

Таким образом, для вычисления тонких пределов необходимо получить более точные асимптотические оценки для функций, стоящих в левых частях формул (8.77).

Такие оценки немедленно вытекают из формулы Маклорена (8.54), если в этой формуле взять остаточный член в форме Пеано (8.57). Записывая формулы Маклорена (8.63), (8.72), (8.66), (8.61) и (8.65) и беря в каждой из этих формул остаточный член в форме Пеано, получим следующие асимптотические оценки:

$$\begin{gathered}
\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \ldots + (-1)^{\frac{n-1}{2}} \frac{x^n}{n!} + o(x^{n+1}), \\
(1+x)^\alpha = 1 + \frac{\alpha}{1!}x + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2!}x^2 + \ldots \\
\ldots + \frac{\alpha(\alpha-1)\ldots(\alpha-n+1)}{n!}x^n + o(x^n), \\
\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \ldots + (-1)^{n-1}\frac{x^n}{n} + o(x^n), \\
e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \ldots + \frac{x^n}{n!} + o(x^n), \\
\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \ldots + (-1)^{\frac{n}{2}}\frac{x^n}{n!} + o(x^{n+1}).
\end{gathered} \tag{8.79}$$

(Здесь в первой из формул (8.79) n — любое *нечетное* число, а в последней из формул (8.79) n — любое *четное* число.) Формулы (8.79) оценивают соответствующие элементарные функции с точностью до членов *любого порядка* n относительно малой величины x. Эти формулы являются эффективным средством для вычисления ряда тонких предельных значений.

Приведем примеры использования асимптотических формул (8.79).

1°. В качестве первого примера рассмотрим уже записанное выше предельное значение (8.78). Привлекая первую из формул (8.79) (взятую при $n = 3$), будем иметь

$$\lim_{x\to 0}\frac{\sin x - x}{x^3} = \lim_{x\to 0}\frac{x - \dfrac{x^3}{3!} + o(x^4) - x}{x^3} = \lim_{x\to 0}\left[-\frac{1}{3!} + o(x)\right] = -\frac{1}{3!}.$$

2°.

$$I = \lim_{x\to 0}\frac{e^{-x^2/2} - \cos x}{x^3 \sin x}.$$

Исходя из вида знаменателя, можно заключить, что определяющую роль должны играть члены 4-го порядка относительно x (ибо $\sin x = x + o(x)$). Пользуясь формулами (8.79), можем записать

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + o(x^5), \tag{8.80}$$

$$\sin x = x + o(x), \tag{8.81}$$

$$e^z = 1 + z + \frac{z^2}{2} + o(z^2).$$

Стало быть, при $z = -x^2/2$ получим

$$e^{-\frac{x^2}{2}} = 1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{8} + o(x^4). \tag{8.82}$$

В силу формул (8.80), (8.81) и (8.82) искомое предельное значение может быть переписано в виде

$$I = \lim_{x\to 0} \frac{1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{8} + o(x^4) - 1 + \frac{x^2}{2} - \frac{x^4}{24}}{x^4 + o(x^4)} =$$

$$= \lim_{x\to 0} \frac{\frac{1}{8} - \frac{1}{24} + \alpha(x)}{1 + \alpha(x)} = \frac{1}{8} - \frac{1}{24} = \frac{1}{12}.$$

$\Big($Здесь символом $\alpha(x)$ мы обозначили величину $\dfrac{o(x^4)}{x^4}$, являющуюся бесконечно малой при $x \to 0.\Big)$

3°.

$$I = \lim_{x\to 0} \left(\cos x + \frac{x^2}{2}\right)^{\frac{1}{x(\sin x - x)}}.$$

Обозначим через y величину[1] $y = \left(\cos x + \dfrac{x^2}{2}\right)^{\frac{1}{x(\sin x - x)}}$. Тогда $I = \lim\limits_{x\to 0} y$. Логарифмируя выражение для y, будем иметь

$$\ln y = \frac{1}{x(\sin x - x)} \ln\left(\cos x + \frac{x^2}{2}\right).$$

Вычислим

$$\lim_{x\to 0} \ln y = \lim_{x\to 0} \frac{\ln\left(\cos x + \frac{x^2}{2}\right)}{x(\sin x - x)}.$$

---

[1]) При малых x выражение $\left(\cos x + \dfrac{x^2}{2}\right)$ заведомо *положительно.*

Поскольку $\cos x = 1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} + o(x^5)$, $\sin x = x - \frac{x^3}{6} + o(x^4)$, получим

$$\lim_{x\to 0} \ln y = \lim_{x\to 0} \frac{\ln\left(1 + \frac{x^4}{24} + o(x^5)\right)}{-\frac{x^4}{6} + o(x^5)}.$$

Учтем теперь, что $\ln(1+z) = z + o(z)$. Из этой формулы

$$\ln\left(1 + \frac{x^4}{24} + o(x^5)\right) = \frac{x^4}{24} + o(x^4).$$

Таким образом,

$$\lim_{x\to 0} \ln y = \lim_{x\to 0} \frac{\frac{x^4}{24} + o(x^4)}{-\frac{x^4}{6} + o(x^5)} = \lim_{x\to 0} \frac{\frac{1}{24} + \frac{o(x^4)}{x^4}}{-\frac{1}{6} + o(x)} = -\frac{1}{4}.$$

Отсюда

$$I = \lim_{x\to 0} y = e^{-\frac{1}{4}}.$$

ДОПОЛНЕНИЕ

ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ФУНКЦИЙ

В настоящем Дополнении мы изучим вопрос о вычислении значений простейших элементарных функций.

Для вычисления значений всех указанных функций используются два вида алгоритмов, первый из которых основан на разложении вычисляемой функции по формуле Тейлора, а второй — на разложении ее в цепную или непрерывную дробь [1]). Первый алгоритм позволяет составить единую программу вычислений значений логарифмической и обратных тригонометрических функций. Второй алгоритм лежит в основе универсальной программы вычислений остальных простейших элементарных функций.

Помимо обоснования указанных алгоритмов, мы проведем оценку числа итераций, обеспечивающих заданную точность вычислений.

1. Вычисление логарифмической и обратных тригонометрических функций. Вычисление этих функций основано на применении формулы Тейлора. Мы подробно рассмотрим вопрос о вычислении логарифма и арктангенса. Вычисление значений $\operatorname{arcctg} x$, $\arcsin x$ и $\arccos x$ легко сводится к вычислению арктангенса с помощью следующих известных формул:

$$\operatorname{arcctg} x = \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} x, \quad \arcsin x = \operatorname{arctg} \frac{x}{\sqrt{1-x^2}},$$

$$\arccos x = \operatorname{arcctg} \frac{x}{\sqrt{1-x^2}}.$$

---

[1]) Сведения о непрерывных дробях читатель может найти в учебнике А.П. Киселева «Алгебра» (Учпедгиз, 1959, с. 188–201).

1. Вычисление $\ln a$. Представим число $a > 0$ в следующей форме:

$$a = 2^p M, \tag{8.83}$$

где p — целое число, а M удовлетворяет условиям

$$\frac{1}{2} \leqslant M < 1. \tag{8.84}$$

Отметим, что представление a в форме (8.83) единственно. Используя формулу (8.83), получим для $\ln a$ следующее выражение:

$$\ln a = p \ln 2 + \ln M. \tag{8.85}$$

Полагая

$$M = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1+x}{1-x} \tag{8.86}$$

и подставляя это выражение для M в (8.85), преобразуем формулу (8.85) для $\ln a$ к следующему виду:

$$\ln a = \left(p - \frac{1}{2}\right) \ln 2 + \ln \frac{1+x}{1-x}. \tag{8.87}$$

Разложим функцию $\ln \dfrac{1+x}{1-x}$ по формуле Маклорена. Легко убедиться, что это разложение с остаточным членом в форме Лагранжа имеет следующий вид:

$$\ln \frac{1+x}{1-x} = 2x + \frac{2x^3}{3} + \frac{2x^5}{5} + \ldots + \frac{2x^{2n+1}}{2n+1} R_{2n+2}(x), \tag{8.88}$$

где

$$R_{2n+2}(x) = \frac{x^{2n+1}}{2n+2} \left[\frac{1}{(1+\theta x)^{2n+2}} - \frac{1}{(1-\theta x)^{2n+2}} \right], \tag{8.89}$$

а число θ заключено строго между нулем и единицей.

Для приближенного вычисления $\ln a$ используется следующая формула:

$$\ln a \approx \left(p - \frac{1}{2}\right) \ln 2 + 2\left(x + \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} + \ldots + \frac{x^{2n+1}}{2n+1}\right), \tag{8.90}$$

которая получается из (8.87) путем замены $\ln \dfrac{1+x}{1-x}$ частью формулы Маклорена (8.88) для этой функции без остаточного члена $R_{2n+2}(x)$. Заметим, что число x в приближенной формуле (8.90) для $\ln a$ определяется из формулы (8.86) с учетом ограничений (8.84), наложенных на M.

Перейдем к оценке погрешности формулы (8.90). Так как приближенное значение $\ln a$, вычисляемое по формуле (8.90), отличается от точного значения, вычисляемого по формуле (8.87), на величину остаточного члена $R_{2n+2}(x)$, то для выяснения погрешности достаточно оценить этот остаточный член.

Во-первых, выясним границы изменения x. Из формулы (8.86) получаем

$$x = \frac{M\sqrt{2} - 1}{M\sqrt{2} + 1}. \tag{8.91}$$

Из (8.91) следует, что для значений M, удовлетворяющих неравенствам (8.84), абсолютная величина x удовлетворяет условию [1])

$$|x| < 0{,}172. \tag{8.92}$$

Заметим теперь, что структура остаточного члена $R_{2n+2}(x)$ такова, что оценка для отрицательных и положительных значений x может быть проведена одинаковым способом (из формулы (8.89) видно, что замена x на $-x$ не изменяет структуры $R_{2n+2}(x)$). Поэтому достаточно получить оценку $R_{2n+2}(x)$ для $x \geqslant 0$. Учитывая это и неравенство (8.92), получим, заменяя в правой части (8.89) величину x числом 0,172, величину $\dfrac{1}{1+\theta x}$ — единицей, а величину $\dfrac{1}{1-\theta x}$ — числом $\dfrac{1}{1-0{,}172}$, следующую оценку:

$$|R_{2n+2}(x)| \leqslant \frac{(0{,}172)^{2n+2}}{2n+2}\left[1 + \frac{1}{(1-0{,}172)^{2n+2}}\right].$$

В последней формуле внесем $(0{,}172)^{2n+2}$ в квадратные скобки. Так как $\dfrac{0{,}172}{1-0{,}172} < 0{,}208$, получим следующую оценку для $R_{2n+2}(x)$:

$$|R_{2n+2}(x)| \leqslant \frac{(0{,}172)^{2n+2} + (0{,}208)^{2n+2}}{2n+2}. \tag{8.93}$$

При вычислении $\ln a$ на электронно-вычислительной машине [2]) формулу (8.90) берут обычно при $n = 6$. Точность вычислений для этого случая оценивается, как видно из (8.93), числом $\dfrac{(0{,}172)^{14} + (0{,}208)^{14}}{14}$, которое не превышает $1{,}625 \cdot 10^{-10}$.

2. Вычисление $\operatorname{arctg} \alpha$. Очевидно, можно ограничиться случаем положительных значений аргумента, ибо, полагая $|\alpha| = x$, найдем

$$\operatorname{arctg} \alpha = \operatorname{sgn} \alpha \cdot \operatorname{arctg} x.$$

Укажем теперь стандартные преобразования, с помощью которых вычисление $\operatorname{arctg} x$ для значений аргумента x, не меньших $1/8$, приводится к вычислению арктангенса для значений аргумента, меньших $1/8$.

Пусть сначала $x \geqslant 1$. Положим $y = \operatorname{arctg} x$, т. е. $x = \operatorname{tg} y$, и $x_1 = \operatorname{tg}(y - \operatorname{arctg} 1)$. Из последней формулы получаем $x_1 = \dfrac{\operatorname{tg} y - 1}{\operatorname{tg} y + 1} = \dfrac{x-1}{x+1} < 1$. Так как $\operatorname{arctg} x = \operatorname{arctg} 1 + \operatorname{arctg} x_1 = \dfrac{\pi}{4} + \operatorname{arctg} x_1$, то вычисление $\operatorname{arctg} x$ для значений $x \geqslant 1$ приводится к вычислению $\operatorname{arctg} x_1$ при $0 < x_1 < 1$.

Обратимся теперь к случаю, когда аргумент удовлетворяет неравенствам $\dfrac{1}{8} \leqslant x < 1$.

Пусть $k_1 = 1$, $k_2 = 1/2$, $k_3 = 1/4$, $k_4 = 1/8$. Очевидно, для некоторого $i = 1, 2, 3, 4$ выполняются неравенства

$$k_i \leqslant x < 2k_i. \tag{8.94}$$

[1]) Так как x является функцией от M, то вопрос сводится к разысканию максимального значения модуля функции (8.91) на сегменте $[1/2, 1]$.

[2]) Именно так вычисляется $\ln a$ на электронно-вычислительной машине БЭСМ-6.

Положим $y = \operatorname{arctg} x$, т. е. $x = \operatorname{tg} y$ и $x_\imath = \operatorname{tg}(y - \operatorname{arctg} k_\imath)$. Из этой формулы получаем

$$x_\imath = \frac{\operatorname{tg} y - k_\imath}{1 + k_\imath \operatorname{tg} y} = \frac{x - k_\imath}{1 + k_\imath x}.$$

Так как $x > 0$, то $1 + k_\imath x > 1$, кроме того, согласно правому из неравенств (8.94), $x - k_\imath < 2k_\imath - k_\imath = k_\imath$. Поэтому ив последнего выражения для $x_\imath$ получаем неравенство $x_\imath < k_\imath$. Поскольку $\operatorname{arctg} x = \operatorname{arctg} k_\imath + \operatorname{arctg} x_\imath$, то вычисление $\operatorname{arctg} x$ для значений x, удовлетворяющих неравенствам (8.94), приводится к вычислению $\operatorname{arctg} x_i$ при $0 < x_\imath < k_i$.

Повторяя описанные преобразовании аргумента x самое большее четыре раза, мы приведем вычисление $\operatorname{arctg} x$ для значений x из полуинтервала $1/8 \leqslant x < 1$ к вычислению арктангенса для значений аргумента, меньших $1/8$.

Для вычисления $\operatorname{arctg} x$ при $x < 1/8$ используется формула Маклорена

$$\operatorname{arctg} x = x - \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} - \ldots + (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{2n+1} + R_{2n+2}(x).$$

При вычислениях обычно последнюю формулу берут при $n = 6$ и отбрасывают остаточный член [1]). Программа вычислений для логарифма и арктангенса общая. При пользовании этой программой для арктангенса надо лишь позаботиться о перемене знаков у соседних членов $\dfrac{x^{2n+1}}{2n+1}$.

2. Вычисление тригонометрических функций, показательной функции и гиперболических функций. Вычисление этих функций основано на применении ц е п н ы х (или, как их еще называют, н е п р е р ы в н ы х) д р о б е й. Необходимые нам свойства этих дробей приводятся ниже в п. 1.

Вычисление всех перечисленных функций связано с определенной цепной дробью, которая получается при разложении функции $\operatorname{th} x$. Поэтому мы подробно рассмотрим вычисление значений функции $\operatorname{th} x$, а затем укажем, каким образом вычисляются остальные функции.

1. Н е к о т о р ы е с в е д е н и я о ц е п н ы х д р о б я х. *Конечной цепной дробью* $\dfrac{P_n}{Q_n}$ называется выражение вида

$$\frac{P_n}{Q_n} = b_0 + \cfrac{a_1}{b_1 + \cfrac{a_2}{b_2 + \cfrac{a_3}{b_3 + \ddots + \cfrac{a_n}{b_n}}}}. \tag{8.95}$$

Величины $a_1, a_2, \ldots, a_n$ обычно называются *частными числителями*, а $b_0, b_1, \ldots, b_n$ — *частными знаменателями*.

Цепные дроби

$$\frac{P_0}{Q_0} = \frac{b_0}{1}, \ \frac{P_1}{Q_1} = b_0 + \frac{a_1}{b_1}, \ \frac{P_2}{Q_2} = b_0 + \cfrac{a_1}{b_1 + \cfrac{a_2}{b_2}}, \ \ldots \tag{8.96}$$

[1]) Именно так поступают, например, при вычислениях на электронной машине БЭСМ-6.

называются *подходящими* дробями для дроби $\frac{P_n}{Q_n}$.

Если положить $P_{-1} = 1$, $Q_{-1} = 0$, то из выражений (8.96) для подходящих дробей $\frac{P_k}{Q_k}$ $(k = 1, 2, \ldots , n)$ можно получить следующие формулы, связывающие P_k с P_{k-1} и P_{k-2} и Q_k с Q_{k-1} и Q_{k-2}:

$$\begin{aligned} P_k &= b_k P_{k-1} + a_k P_{k-2}, \\ Q_k &= b_k Q_{k-1} + a_k Q_{k-2}. \end{aligned} \tag{8.97}$$

Нам понадобится специальная формула для дроби $\frac{P_n}{Q_n}$, определяемой соотношением (8.95). Для установления этой формулы сравним две подходящие дроби $\frac{P_k}{Q_k}$ и $\frac{P_{k-1}}{Q_{k-1}}$. Разность этих дробей, очевидно, равна

$$\frac{P_k}{Q_k} - \frac{P_{k-1}}{Q_{k-1}} = \frac{P_k Q_{k-1} - Q_k P_{k-1}}{Q_{k-1} Q_k}. \tag{8.98}$$

Числитель правой части (8.98) в силу (8.97) может быть записан в виде

$$\begin{aligned} P_k Q_{k-1} - Q_k P_{k-1} = (b_k P_{k-1} + a_k P_{k-2}) Q_{k-1} - (b_k Q_{k-1} + a_k Q_{k-2}) P_{k-1} = \\ = -a_k [P_{k-1} Q_{k-2} - Q_{k-1} P_{k-2}]. \end{aligned} \tag{8.99}$$

Последовательно используя соотношение (8.99) для значений k, $(k-1)$, $(k-2)$, ..., 1 и учитывая, что $P_{-1} = 1$, $Q_{-1} = 0$, $Q_0 = 1$, мы придадим дроби (8.98) следующий вид:

$$\frac{P_k}{Q_k} - \frac{P_{k-1}}{Q_{k-1}} = (-1)^{k+1} a_k a_{k-1} \ldots a_1 \frac{1}{Q_{k-1} Q_k}. \tag{8.100}$$

Так как

$$\frac{P_n}{Q_n} = \frac{P_0}{Q_0} + \left(\frac{P_1}{Q_1} - \frac{P_0}{Q_0}\right) + \left(\frac{P_2}{Q_2} - \frac{P_1}{Q_1}\right) + \ldots + \left(\frac{P_n}{Q_n} - \frac{P_{n-1}}{Q_{n-1}}\right),$$

то с помощью (8.100) мы и получим необходимую нам специальную формулу для дроби $\frac{P_n}{Q_n}$:

$$\frac{P_n}{Q_n} = b_0 + \frac{a_1}{Q_0 Q_1} - \frac{a_1 a_2}{Q_1 Q_2} + \ldots + (-1)^{n+1} \frac{a_1 a_2 \ldots a_n}{Q_{n-1} Q_n}. \tag{8.101}$$

2. Разложение функции $\operatorname{th} x$ в цепную дробь. Используемый в этом пункте способ разложения функции $\operatorname{th} x$ в цепную дробь был предложен Шлёмильхом [1]) для разложения в цепную дробь функции $\operatorname{tg} x$.

Рассмотрим функцию $y = \operatorname{ch} \sqrt{x}$ для значений $x > 0$. Очевидны следующие тождества, получаемые последовательными дифференцированиями данной функции и простыми преобразованиями:

$$2\sqrt{x}\, y' = \operatorname{sh} \sqrt{x}, \quad 2\sqrt{x}\, y'' + \frac{y'}{\sqrt{x}} - \frac{y}{2\sqrt{x}} = 0.$$

---

[1]) Schlömilch O. Ueber den Kettenbruch für $\operatorname{tg} x$. // Zs. Math. u. Phys. 1857. V. 2. S. 137–165.

Из последнего соотношения получаем тождество, справедливое для всех $x > 0$:

$$4xy'' + 2y' - y = 0. \tag{8.102}$$

Последовательно дифференцируя тождество (8.102), будем иметь

$$\begin{gathered} 4xy''' + 6y'' - y' = 0, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ 4xy^{(n+2)} + (4n+2)y^{(n+1)} - y^{(n)} = 0. \end{gathered} \tag{8.103}$$

Обозначим отношение $\dfrac{y^{(n+1)}}{y^{(n)}}$ через u_{n+1}. Тогда из последнего соотношения (8.103) получим тождество $4xu_{n+2} + 4n + 2 = \dfrac{1}{u_{n+1}}$, из которого вытекает соотношение

$$u_{n+1} = \frac{1/2}{2n + 1 + 2xu_{n+2}}. \tag{8.104}$$

Так как $u_1 = \dfrac{y'}{y} = \dfrac{\operatorname{th}\sqrt{x}}{2\sqrt{x}}$, то соотношение (8.104) при $n = 0$ может быть записано в следующей форме:

$$\operatorname{th}\sqrt{x} = \frac{\sqrt{x}}{1 + 2xu_2}.$$

В правой части этой формулы заменим u_2 его выражением, полученным с помощью (8.104) при $n = 1$. В результате получим формулу

$$\operatorname{th}\sqrt{x} = \cfrac{\sqrt{x}}{1 + \cfrac{x}{3 + 2xu_3}}.$$

В последнем соотношении мы можем заменить u_3 его выражением, полученным с помощью (8.104) при $n = 2$. Такого рода операции мы можем провести любое конечное число раз. В результате получим разложение функции $\operatorname{th}\sqrt{x}$ в цепную дробь. Заменяя в этом разложении $\sqrt{x}$ на x, найдем нужное нам разложение функции $\operatorname{th} x$ в конечную цепную дробь. Это разложение имеет вид

$$\operatorname{th} x = \cfrac{x}{1 + \cfrac{x^2}{3 + \cfrac{x^2}{5 + \ddots + \cfrac{x^2}{2n + 1 + 2x^2 u_{n+2}}}}}. \tag{8.105}$$

3. Вычисление значений функции $\operatorname{th} x$. Оценка погрешности вычислений. Вычисление значений функции $\operatorname{th} x$ на электронно-вычислительной машине обычно производится с помощью формулы (8.105), в которой отбрасывается член $2x^2u_{n+2}$. При этом n берется равным 6 ($n = 6$), значения же x по абсолютной величине ограничиваются числом $\pi/4$.

Мы проведем оценку погрешности для любого номера n.

Обозначим приближенное значение функции $\operatorname{th} x$, полученное из (8.105) путем отбрасывания члена $2x^2u_{n+2}$, через $\overline{\operatorname{th}}\, x$. Для выяснения точности вычислений мы должны, очевидно, оценить разность $\operatorname{th} x - \overline{\operatorname{th}}\, x$. Заметим, что $\operatorname{th} x$ и $\overline{\operatorname{th}}\, x$ представляют собой цепные дроби, которые мы обозначим соответственно $\dfrac{P_{n+1}}{Q_{n+1}}$ и $\dfrac{\overline{P}_{n+1}}{\overline{Q}_{n+1}}$.

Выпишем значения частных числителей a_i, $\overline{a}_i$ и частных знаменателей b_i, $\overline{b}_i$ для этих дробей (черточкой сверху мы будем обозначать величины, относящиеся к дроби $\dfrac{\overline{P}_{n+1}}{\overline{Q}_{n+1}}$). Имеем

$$\begin{gathered} a_1 = \overline{a}_1 = x, \quad a_2 = \overline{a}_2 = x^2, \quad \ldots, \quad a_{n+1} = \overline{a}_{n+1} = x^2, \\ b_0 = \overline{b}_0 = 0, \quad b_1 = \overline{b}_1 = 1, \quad \ldots, \quad b_n = \overline{b}_n = 2n-1, \\ b_{n+1} = 2n+1+2x^2u_{n+2}, \quad \overline{b}_{n+1} = 2n+1. \end{gathered} \tag{8.106}$$

Так как для дробей $\dfrac{P_{n+1}}{Q_{n+1}}$ и $\dfrac{\overline{P}_{n+1}}{\overline{Q}_{n+1}}$ $Q_{-1} = \overline{Q}_{-1} = 0$ и $Q_0 = \overline{Q}_0 = 1$, то с помощью формул (8.106) и соотношений (8.97) получаем следующие равенства:

$$\begin{gathered} Q_1 = \overline{Q}_1, \; Q_2 = \overline{Q}_2, \; \ldots \; Q_n = \overline{Q}_n, \\ Q_{n+1} = (2n+1+2x^2u_{n+2})\overline{Q}_n + x^2\overline{Q}_{n-1}, \; \overline{Q}_{n+1} = (2n+1)\overline{Q}_n + x^2\overline{Q}_{n-1}. \end{gathered} \tag{8.107}$$

Представим теперь каждую из дробей $\dfrac{P_{n+1}}{Q_{n+1}}$ и $\dfrac{\overline{P}_{n+1}}{\overline{Q}_{n+1}}$ в виде (8.101). Из формул (8.106) и (8.107) ясно, что эти представления будут отличаться лишь последними слагаемыми. Поэтому разность $\dfrac{P_{n+1}}{Q_{n+1}} - \dfrac{\overline{P}_{n+1}}{\overline{Q}_{n+1}}$ будет равна разности последних слагаемых представлений этих дробей по формуле (8.101). Так как разность рассматриваемых дробей равна $\operatorname{th} x - \overline{\operatorname{th}}\, x$, то, используя (8.106), получим следующую формулу:

$$\operatorname{th} x - \overline{\operatorname{th}}\, x = (-1)^{n+2} x^{2n+1} \left[\frac{1}{Q_n Q_{n+1}} - \frac{1}{\overline{Q}_n \overline{Q}_{n+1}} \right].$$

Это соотношение с помощью формул (8.107) легко преобразовывается к следующему виду:

$$\operatorname{th} x - \overline{\operatorname{th}}\, x = (-1)^{n+1} \frac{x^{2n+1}}{\overline{Q}_n \overline{Q}_{n+1}} \left[\frac{2x^2\overline{Q}_n u_{n+2}}{2x^2\overline{Q}_n u_{n+2} + (2n+1)\overline{Q}_n + x^2\overline{Q}_{n-1}} \right]. \tag{8.108}$$

Для получения нужной нам оценки воспользуемся следующими двумя неравенствами, которые будут доказаны ниже.

При $x \geqslant 0$ для любого $k \geqslant 1$ справедливо неравенство:

$$Q_k \geqslant (2k-1)!! \tag{8.109}$$

При $x > 0$ величина u_{n+2} положительна:

$$u_{n+2} > 0. \tag{8.110}$$

Перейдем теперь к оценке разности $\operatorname{th} x - \overline{\operatorname{th}}\, x$ при $x > 0$. Так как при $x > 0$ $u_{n+2} > 0$ (см. (8.110)) и любое $\overline{Q}_k > 0$ (см. (8.109)), то выражение в квадратных скобках в правой части равенства (8.108) не превосходит единицы. Далее, из (8.109) получаем следующее неравенство:

$$\overline{Q}_n \overline{Q}_{n+1} \geqslant [(2n-1)!!]^2 (2n+1).$$

Поэтому при $x > 0$ для любого номера n справедлива следующая оценка погрешности:

$$|\operatorname{th} x - \overline{\operatorname{th}}\, x| \leqslant \frac{x^{2n+1}}{[(2n-1)!!]^2(2n+1)}. \tag{8.111}$$

Остановимся на оценке погрешности при $n = 6$ для значений x, удовлетворяющих неравенствам $0 < x < \pi/4$. При $n = 6$ число $2n - 1$ равно 11, а число $2n + 1$ равно 13. Так как $(\pi/4) < 0{,}8$, то $x^{13} < (0{,}8)^{13} < 5{,}6 \cdot 10^{-2}$. Легко подсчитать, что $11!! = 10\,395$. Поэтому, учитывая, что $2 \cdot 6 + 1 = 13$, из формулы (8.111) получим, что ошибка в приближенном вычислении $\operatorname{th} x$ для $n = 6$ не превышает $4 \cdot 10^{-11}$.

Докажем теперь неравенства (8.109) и (8.110).

Доказательство неравенства (8.109).

Докажем сначала неотрицательность любого $\overline{Q}_k$. Из формул (8.106) вытекает неотрицательность $\overline{b}_k$ и $\overline{a}_k$ при $x \geqslant 0$ для любого $k \leqslant n$. Мы уже отмечали, что $\overline{Q}_{-1} = 0$, $Q_0 = 1$. Отсюда и из второй из формул (8.97) вытекает неотрицательность $\overline{Q}_k$ для любого $k \leqslant n$.

Из второй формулы (8.97), а также из неотрицательности a_k и $\overline{Q}_k$ вытекает неравенство

$$\overline{Q}_k \geqslant b_k \overline{Q}_{k-1}. \tag{8.112}$$

Так как $\overline{Q}_0 = 1$, а $b_k = 2k - 1$ при $1 \leqslant k \leqslant n$, то последовательно из неравенства (8.112) получаем $\overline{Q}_1 \geqslant 1$, $\overline{Q}_2 \geqslant 3$, ..., $\overline{Q}_k \geqslant (2k-1)!!$. Справедливость неравенства (8.109) установлена.

Доказательство неравенства (8.110).

Достаточно доказать, что все производные функции $y = \operatorname{ch}\sqrt{x}$ при $x > 0$ положительны. Очевидно, тем самым мы докажем неравенство (8.110), ибо $u_{n+2} = \dfrac{y^{(n+2)}}{y^{(n+1)}}$.

Умножая последнее соотношение (8.103) на $\dfrac{x^{n-1/2}}{4}$, мы можем переписать это соотношение в виде

$$\left[x^{n+1/2} y^{(n+1)}(x)\right]' = \frac{x^{n-1/2}}{4} y^{(n)}. \tag{8.113}$$

Убедимся теперь в том, что

$$\lim_{x \to 0+0} \left[x^{n+1/2} y^{(n+1)}(x)\right] = 0. \tag{8.114}$$

Для этого достаточно убедиться в том, что величина

$$x^n y^{(n+1)}(x) \tag{8.115}$$

ограничена при $x \to 0+0$. Из соотношений $y = \operatorname{ch}\sqrt{x}$ и $y' = \dfrac{\operatorname{sh}\sqrt{x}}{2\sqrt{x}}$ вытекает, что $y(x)$ и $y'(x)$ ограничены при $x \to 0+0$. Но тогда из (8.102) вытекает, что и величина $xy^2(x)$ ограничена при $x \to 0+0$.

После этого из последнего соотношения (8.103) по индукции получается, что величина (8.115) ограничена при $x \to 0+0$ для любого номера n. Тем самым соотношение (8.114) доказано.

Докажем теперь, что для любого номера n производная

$$y^{(n)}(x) \tag{8.116}$$

положительна при $x > 0$. Очевидно, что $y^{(0)}(x) = y(x) = \operatorname{ch}\sqrt{x}$ положительна при $x > 0$. Предположим, что для некоторого номера n величина (8.116) положительна при $x > 0$. Убедимся тогда, что и $y^{(n+1)}(x)$ положительна при $x > 0$. Из (8.113) заключаем, что производная в левой части (8.113) положительна при $x > 0$, т. е. функция $x^{n+1/2}y^{(n+1)}(x)$ возрастает при $x > 0$. Но тогда из (8.114) следует, что эта функция положительна при $x > 0$. Итак, $y^{(n+1)}(x) > 0$ при $x > 0$, и неравенство (8.110) доказано.

4. Вычисление гиперболического синуса, гиперболического косинуса и показательной функции. В дальнейшем символом $S_n(t)$ мы будем обозначать следующую цепную дробь:

$$S_n(t) = 1 + \cfrac{t}{3 + \cfrac{t}{5 + \ddots + \cfrac{t}{2n+1}}}. \tag{8.117}$$

Обычно для электронно-вычислительной машины составляют программу вычисления этой цепной дроби. Используя эту программу, можно без затруднений составить программу вычислений гиперболического тангенса, ибо, как было выяснено в предыдущем пункте, приближенное значение $\operatorname{th} x$ может быть вычислено по формуле

$$\operatorname{th} x \approx \frac{x}{S_n(x^2)}, \tag{8.118}$$

причем в предыдущих пунктах было также выяснено, что с увеличением n точность вычислений возрастает и погрешность стремится к нулю.

Вычисление функций $\operatorname{sh} 2x$, $\operatorname{ch} 2x$, e^{2x} может быть редуцировано к вычислению гиперболического тангенса с помощью формул

$$\operatorname{sh} 2x = \frac{2\operatorname{th} x}{1-\operatorname{th}^2 x}, \quad \operatorname{ch} x = \frac{1+\operatorname{th}^2 x}{1-\operatorname{th}^2 x}, \quad e^{2x} = \frac{1+\operatorname{th} x}{1-\operatorname{th} x}.$$

Из этих формул и из соотношения (8.118) получаются следующие формулы для приближенных значений перечисленных функций:

$$\operatorname{sh} 2x \approx \frac{2S_n(x^2)\cdot x}{S_n^2(x^2)-x^2}, \quad \operatorname{ch} 2x \approx \frac{S_n^2(x^2)+x^2}{S_n^2(x^2)-x^2}, \quad e^{2x} \approx \frac{S_n(x^2)+x}{S_n(x^2)-x}.$$

Ясно, что с помощью этих формул и программы вычислений для $S_n(t)$ легко составляются программы для вычисления $\operatorname{sh} 2x$, $\operatorname{ch} 2x$ и e^{2x}.

5. Вычисление тригонометрических функций. По аналогии с разложением в цепную дробь функции $\operatorname{th} x$ строится разложение для функции $\operatorname{tg} x$.

Рассмотрим функцию $y = \cos\sqrt{x}$ для значений $x > 0$. Очевидны следующие соотношения, получаемые последовательными дифференцированиями этой функции и простыми преобразованиями:

$$2\sqrt{x}\,y' = -\sin\sqrt{x}, \quad 2\sqrt{x}\,y'' + \frac{y'}{\sqrt{x}} = -\frac{y}{2\sqrt{x}}.$$

Из последнего соотношения получаем тождество

$$4xy'' + 2y' + y = 0.$$

Последовательно дифференцируя это тождество, будем иметь

$$4xy''' + 6y'' + y' = 0,$$

$$\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots$$

$$4xy^{(n+2)} + (4n+2)y^{(n+1)} + y^{(n)} = 0.$$

Обозначим отношение $\dfrac{y^{(n+1)}}{y^{(n)}}$ через u_{n+1}. Тогда из последнего равенства получим равенство $4xu_{n+2} + 4n + 2 = -\dfrac{1}{u_{n+1}}$, из которого вытекает соотношение

$$u_{n+1} = \frac{-1/2}{2n+1+2xu_{n+2}}.$$

Отсюда, в полной аналогии с рассуждениями для гиперболического тангенса, получаем следующее разложение функции $\operatorname{tg} x$ в цепную дробь:

$$\operatorname{tg} x = \cfrac{x}{1 + \cfrac{-x^2}{3 + \cfrac{-x^2}{5 + \ddots + \cfrac{-x^2}{2n+1+2x^2u_{n+2}}}}}.$$

Приближенное значение $\operatorname{tg} x$ получается из этой формулы путем отбрасывания члена $2x^2u_{n+2}$. С учетом выражения (8.117) это приближенное значение может быть найдено по формуле

$$\operatorname{tg} x \approx \frac{x}{S_n(-x^2)}. \tag{8.119}$$

Как и в случае гиперболического тангенса, можно убедиться, что с увеличением n точность вычислений по формуле (8.119) возрастает и погрешность стремится к нулю.

С помощью известных из курса элементарной математики формул $\sin 2x = \dfrac{2\operatorname{tg} x}{1+\operatorname{tg}^2 x}$ и $\cos 2x = \dfrac{1-\operatorname{tg}^2 x}{1+\operatorname{tg}^2 x}$ и соотношения (8.119) получаем следующие формулы для вычисления приближенных значений $\sin 2x$ и $\cos 2x$:

$$\sin 2x \approx \frac{2S_n(-x^2)\cdot x}{S_n^2(-x^2) - x^2}, \quad \cos 2x \approx \frac{S_n^2(-x^2) + x^2}{S_n^2(-x^2) - x^2}.$$

В заключение заметим, что точность вычислений всех функций, указанных в последних двух пунктах, для шести итераций ($n = 6$) будет не меньше 10^{-11} при условии, что аргумент x по абсолютной величине не превышает $\pi/4$.

Г Л А В А 9

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАФИКА ФУНКЦИИ. НАХОЖДЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО И МИНИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЙ ФУНКЦИИ

§ 1. Участки монотонности функции. Отыскание точек экстремума

1. Отыскание участков монотонности функции. В § 10 предыдущей главы мы уже установили ряд условий, обеспечивающих *возрастание* (или соответственно *убывание, невозрастание и неубывание*) функции $f(x)$ на некотором интервале (a, b). Для удобства сформулируем еще раз найденные условия:

1°. Для того чтобы дифференцируемая на интервале (a, b) функция $f(x)$ *не убывала* (*не возрастала*) на этом интервале, необходимо и достаточно, чтобы производная этой функции $f'(x)$ была неотрицательна (неположительна) всюду на этом интервале.

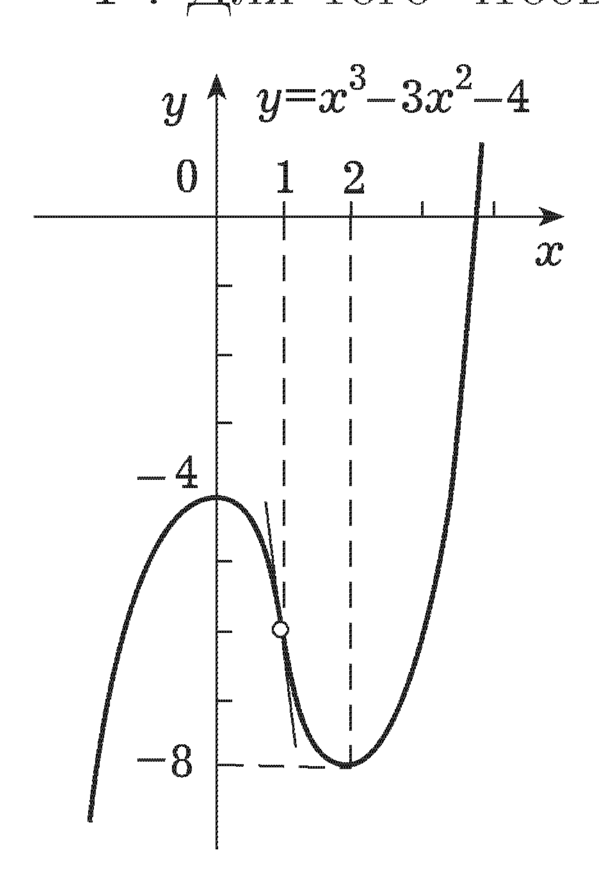


Рис. 9.1

2°. Для того чтобы дифференцируемая функция $f(x)$ *возрастала* (*убывала*) на интервале (a, b), достаточно, чтобы производная $f'(x)$ была положительна (отрицательна) всюду на этом интервале.

Таким образом, изучение вопроса об участках монотонности дифференцируемой функции $f(x)$ сводится *к исследованию знака первой производной этой функции.*

В качестве примера рассмотрим вопрос об отыскании участков монотонности функции $f(x) = x^3 - 3x^2 - 4$. Поскольку

$f'(x) = 3x^2 - 6x = 3x(x-2)$, то, очевидно, $f'(x)$

$$\begin{aligned} &\text{положительна} \quad \text{при} \quad -\infty < x < 0, \\ &\text{отрицательна} \quad \text{при} \quad 0 < x < 2, \\ &\text{положительна} \quad \text{при} \quad 2 < x < +\infty. \end{aligned}$$

Таким образом, рассматриваемая функция возрастает на каждой из полупрямых $(-\infty, 0)$ и $(2, +\infty)$ и убывает на интервале $(0, 2)$. График этой функции изображен на рис. 9.1.

2. Отыскание точек возможного экстремума. В п. 2 § 7 предыдущей главы мы ввели понятие *локального максимума* (*минимума*) функции $f(x)$ и установили *необходимое условие* наличия у функции $f(x)$ в данной точке локального максимума (минимума). Для удобства сформулируем еще раз определения и результаты, установленные в указанном пункте.

Пусть функция $f(x)$ определена всюду в некоторой окрестности точки c. Говорят, что функция $f(x)$ имеет в точке c *локальный максимум* (*минимум*), если найдется такая окрестность точки c, в пределах которой значение $f(c)$ является наибольшим (наименьшим) среди всех других значений этой функции.

Локальный максимум и локальный минимум объединяются общим названием *экстремум*.

Следующая теорема устанавливает *необходимое условие экстремума дифференцируемой функции*: *если функция $f(x)$ дифференцируема в точке c и имеет в этой точке экстремум, то $f'(c) = 0$.*

Таким образом, для отыскания у дифференцируемой функции $f(x)$ точек возможного экстремума следует найти все корни уравнения $f'(x) = 0$ (т. е. найти все нули производной $f'(x)$). Впредь мы будем называть корни уравнения $f'(x) = 0$ точками *возможного экстремума* функции $f(x)$ [1]).

Заметим, однако, что, поскольку равенство нулю первой производной является *лишь необходимым* [2]) условием экстремума, нужно дополнительно исследовать вопрос о наличии экстремума в каждой точке возможного экстремума. Для проведения такого дополнительного исследования следует установить *достаточные условия наличия экстремума*, к чему мы и переходим.

3. Первое достаточное условие экстремума.

Теорема 9.1. *Пусть точка c является точкой возможного экстремума функции $f(x)$, и пусть функция $f(x)$ дифферен-*

---

[1]) Иногда корни уравнения $f'(x) = 0$ называют *стационарными точками.*

[2]) Что это условие не является достаточным, видно хотя бы из рассмотрения функции $y = x^3$. Эта функция не имеет экстремума в точке $x = 0$, в которой $f'(x) = 0$.

цируема всюду в некоторой окрестности точки c. Тогда, если в пределах указанной окрестности производная $f'(x)$ положительна (отрицательна) слева от точки c и отрицательна (положительна) справа от нее то функция $f(x)$ имеет в точке c локальный максимум (минимум). Если же производная $f'(x)$ имеет один и тот же знак слева и справа от точки c, то экстремума в точке c нет.

Доказательство. 1) Пусть сначала производная $f'(x)$ в пределах рассматриваемой окрестности положительна (отрицательна) слева от c и отрицательна (положительна) справа от c. Требуется доказать, что значение $f(c)$ является наибольшим (наименьшим) среди всех значений $f(x)$ в рассматриваемой окрестности. Обозначим через x_0 *любое* значение аргумента из рассматриваемой окрестности, отличное от c. Достаточно доказать, что

$$f(c) - f(x_0) > 0 \quad (< 0).$$

Функция $f(x)$ дифференцируема (а стало быть, и непрерывна) на сегменте $[c, x_0]$. Применяя к $f(x)$ по сегменту $[c, x_0]$ теорему 8.12 Лагранжа, будем иметь

$$f(c) - f(x_0) = f'(\xi)(c - x_0), \tag{9.1}$$

где ξ — некоторое значение аргумента между c и x_0. Поскольку производная $f'(\xi)$ положительна (отрицательна) при $x_0 < c$ и отрицательна (положительна) при $x_0 > c$, правая часть (9.1) положительна (отрицательна).

2) Пусть теперь производная $f'(x)$ имеет один и тот же знак слева и справа от c. Обозначая, как и выше, через x_0 *любое* значение аргумента, отличное от c, и повторяя проведенные выше рассуждения, мы теперь докажем, что правая часть (9.1) имеет *разные* знаки при $x_0 < c$ и при $x_0 > c$. Это доказывает отсутствие экстремума в точке c.

Вытекающее из теоремы 9.1 правило можно кратко сформулировать так: 1) *если при переходе через данную точку c возможного экстремума производная $f'(x)$ меняет знак с плюса на минус (с минуса на плюс), то функция $f(x)$ имеет в точке c локальный максимум (минимум)*; 2) *если же при переходе через данную точку c возможного экстремума производная $f'(x)$ не меняет знака, то экстремума в точке c нет.*

Примеры. 1) Предполагая, что консервная банка имеет форму круглого цилиндра радиуса r и высоты h, определить, при каком соотношении между r и h консервная банка с постоянной площадью полной поверхности имеет наибольший объем.

Обозначим площадь полной поверхности консервной банки через S. Тогда

$$2\pi r^2 + 2\pi rh = S = \text{const}. \tag{9.2}$$

Из этого равенства находим, что

$$h = \frac{S}{2\pi r} - r.$$

Таким образом, мы можем выразить объем V консервной банки как функцию радиуса r: $V = \pi r^2 h = \frac{S}{2}r - \pi r^3$. Задача сведена к отысканию максимума функции $V(r) = \frac{S}{2}r - \pi r^3$. Приравнивая нулю производную $V'(r) = \frac{S}{2} - 3\pi r^2$ и учитывая, что $r > 0$, находим точку возможного экстремума

$$r = \sqrt{\frac{S}{6\pi}}. \tag{9.3}$$

Хотя по смыслу задачи ясно, что единственная точка возможного экстремума является точкой максимума функции $V(r)$, мы можем строго убедиться в этом, используя теорему 9.1 и замечая, что производная $V'(r) = 3\pi\left(\frac{S}{6\pi} - r^2\right)$ положительна при $r < \sqrt{S/6\pi}$ и отрицательна при $r > \sqrt{S/6\pi}$. Установим теперь, при каком соотношении между радиусом r и высотой h реализуется наибольший объем $V(r)$ консервной банки. Для этого поделим равенство (9.2) на r^2 и в правой части полученного при этом равенства воспользуемся соотношением (9.3). При этом получим $\frac{h}{r} = 2$, т. е. $h = 2r$.

Таким образом, *наибольший объем будет у той консервной банки, у которой высота равна диаметру*[1].

2) Найти точки экстремума функции $f(x) = (x-2)^5$. Поскольку $f'(x) = 5(x - 2)^4$, то единственной точкой возможного экстремума является точка $x = 2$.

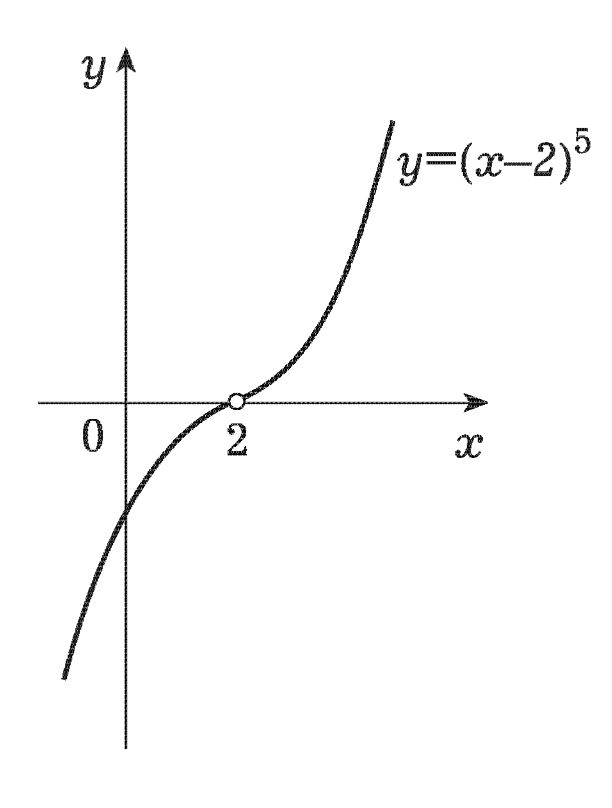


Рис. 9.2

Так как $f'(x)$ положительна, как слева, так и справа от этой точки, то функция $f(x) = (x-2)^5$ вовсе не имеет точек экстремума (график функции $f(x) = (x-2)^5$ изображен на рис. 9.2).

4. Второе достаточное условие экстремума. Иногда вызывает затруднение исследование знака первой производной $f'(x)$ слева и справа от точки возможного экстремума. На этот случай мы укажем другое достаточное условие наличия экстремума в данной точке c возможного экстремума, не требующее

---

[1]) Решенная нами задача показывает, что в интересах экономии жести целесообразно изготовлять консервные банки с высотой, равной диаметру.

исследования знака $f'(x)$ в окрестности c, но зато *предполагающее существование в точке c отличной от нуля конечной второй производной* $f^{(2)}(x)$.

Теорема 9.2. *Пусть функция $f(x)$ имеет в данной точке c возможного экстремума конечную вторую производную. Тогда функция $f(x)$ имеет в точке c максимум, если $f^{(2)}(c) < 0$, и минимум, если $f^{(2)}(c) > 0$.*

Доказательство. Из условия $f^{(2)}(c) < 0$ (> 0) и из теоремы 8.9 вытекает, что функция $f'(x)$ убывает (возрастает) в точке c. Поскольку по условию $f'(c) = 0$, то найдется такая окрестность точки c, в пределах которой $f'(x)$ положительна (отрицательна) слева от c и отрицательна (положительна) справа от c. Но тогда по предыдущей теореме $f(x)$ имеет в точке c максимум (минимум).

Замечание. Теорема 9.2 имеет, вообще говоря, более узкую сферу действия, чем теорема 9.1. Так, теорема 9.2 не решает вопроса об экстремуме для случая, когда вторая производная $f^{(2)}(x)$ не существует в точке c, а также для случая, *когда* $f^{(2)}(c) = 0$. В последнем случае для решения вопроса о наличии экстремума нужно изучить поведение в точке c производных высших порядков, что будет сделано нами в § 4 этой главы.

Примеры. 1. В чашку, имеющую форму полушара радиуса r, опущен однородный стержень длины l (рис. 9.3). Предполагая, что $2r < l < 4r$, найти положение равновесия стержня.

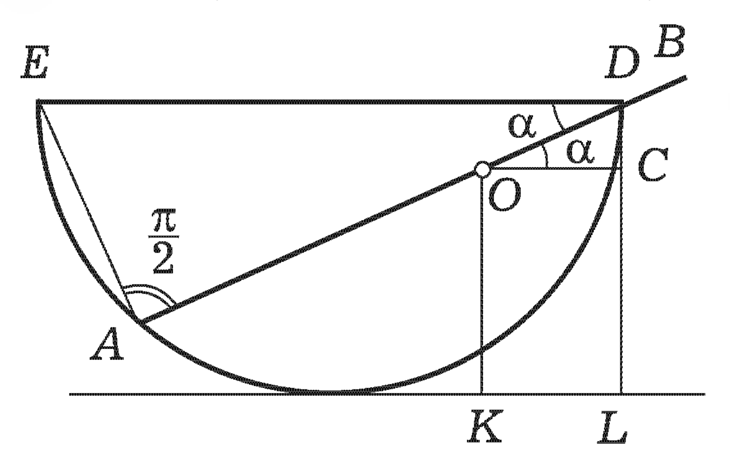


Рис. 9.3

Положению равновесия стержня соответствует минимальное значение его потенциальной энергии, т. е. наинизшее положение центра его тяжести O (поскольку стержень является однородным, центр тяжести его совпадает с его серединой). Обозначая через OK перпендикуляр к плоскости, на которой стоит чашка, мы сведем задачу к отысканию того положения стержня AB, при котором отрезок OK имеет минимальную длину. Прежде всего вычислим длину отрезка OK как функцию угла α наклона стержня к плоскости, на которой стоит чашка. Пусть DL параллельно OK, а OC перпендикулярно OK (D — точка, в которой стержень опирается на край чашки).

Из прямоугольного треугольника EAD следует, что $AD = ED\cos\alpha = 2r\cos\alpha$. По условию $AO = l/2$. Таким образом,

$$OD = AD - AO = 2r\cos\alpha - l/2.$$

С другой стороны, $DC = DL - OK = r - OK$. Поэтому из прямоугольного треугольника ODC имеем

$$\sin\alpha = \frac{DC}{OD} = \frac{r - OK}{2r\cos\alpha - l/2}.$$

Таким образом, длина отрезка OK, которую мы обозначим через $f(\alpha)$, равна $f(\alpha) = r + \frac{l}{2}\sin\alpha - r\sin 2\alpha$.

Переходим к отысканию того значения угла α, которое доставляет минимум $f(\alpha)$. (Понятно, что мы можем ограничиться значениями угла α из первой четверти.) Так как $f'(\alpha) = \frac{l}{2}\cos\alpha - 2r\cos 2\alpha = \frac{l}{2}\cos\alpha + 2r - 4r\cos^2\alpha$, то точки возможного экстремума находятся как решения квадратного уравнения

$$4r\cos^2\alpha - \frac{l}{2}\cos\alpha - 2r = 0.$$

Поскольку $\cos\alpha$ в первой четверти положителен, то нам пригоден только положительный корень этого уравнения

$$\cos\alpha_0 = \frac{l + \sqrt{l^2 + 128r^2}}{16r}. \tag{9.4}$$

Хотя по смыслу задачи и ясно, что единственная точка возможного экстремума α_0 является точкой минимума функции $f(\alpha)$, мы установим это строго при помощи теоремы 9.2. Достаточно убедиться в том, что $f^{(2)}(\alpha_0) > 0$. Поскольку

$$f^{(2)}(\alpha) = -\frac{l}{2}\sin\alpha + 4r\sin 2\alpha = 8r\sin\alpha\left(\cos\alpha - \frac{l}{16r}\right),$$

то, в силу (9.4),

$$f^{(2)}(\alpha_0) = 8r\sin\alpha_0\left(\cos\alpha_0 - \frac{l}{16r}\right) = \frac{\sin\alpha_0}{2}\sqrt{l^2 + 128r^2} > 0.$$

Тем самым установлено, что положению равновесия стержня отвечает угол наклона его к плоскости, на которой стоит чашка, определяемый формулой (9.4).

2. Найти экстремальные значения функции $f(x) = x^3 - 3x^2 - 4$. Эту функцию мы уже исследовали в п. 1 настоящего параграфа (см. рис. 9.1). Так как $f'(x) = 3x^2 - 6x = 3x(x-2)$, то функция $f(x)$ имеет две точки возможного экстремума: $x_1 = 0$ и $x_2 = 2$. Поскольку знак $f'(x)$ слева и справа от этих точек легко выясняется, можно решить вопрос об экстремуме при помощи теоремы 9.1 (первого достаточного условия). Но мы предпочитаем привлечь теорему 9.2 (второе достаточное условие). Имеем

$$f^{(2)}(x) = 6x - 6, \quad f^{(2)}(0) = -6 < 0, \quad f^{(2)}(2) = 6 > 0.$$

Таким образом, функция $f(x)$ имеет максимум в точке 0 и минимум в точке 2. Экстремальные значения этой функции равны

$$f_{\max} = f(0) = -4, \quad f_{\min} = f(2) = -8.$$

5. Экстремум функции, недифференцируемой в данной точке. Общая схема отыскания экстремумов. До сих пор мы решали вопрос о наличии у функции $f(x)$ экстремума *в такой точке c, в которой функция $f(x)$ дифференцируема.* В этом пункте мы изучим вопрос о наличии в точке c экстремума у такой функции, которая не дифференцируема в точке c, но дифференцируема всюду в некоторой окрестности справа и слева от c.

Оказывается, теорема 9.1 может быть обобщена на случай такой функции. Именно, имеет место следующее утверждение.

Теорема 9.3. *Пусть функция $f(x)$ дифференцируема всюду в некоторой окрестности точки c, за исключением, быть может, самой точки c, и непрерывна в точке c.*

Тогда, если в пределах указанной окрестности производная $f'(x)$ положительна (отрицательна) слева от точки c и отрицательна (положительна) справа от точки c, то функция $f(x)$ имеет в точке c локальный максимум (минимум). Если же производная $f'(x)$ имеет один и тот же знак слева и справа от точки c, то экстремума в точке c нет.

Доказательство в точности совпадает с доказательством теоремы 9.1. Только на этот раз применимость к функции $f(x)$ по сегменту $[c, x_0]$ теоремы Лагранжа устанавливается следующим образом: по условию функция $f(x)$ дифференцируема (а стало быть, и непрерывна) всюду на полусегменте $(c, x_0]$ и, кроме того, непрерывна в точке c. Тем самым $f(x)$ непрерывна всюду на сегменте $[c, x_0]$ и дифференцируема во всех внутренних точках этого сегмента.

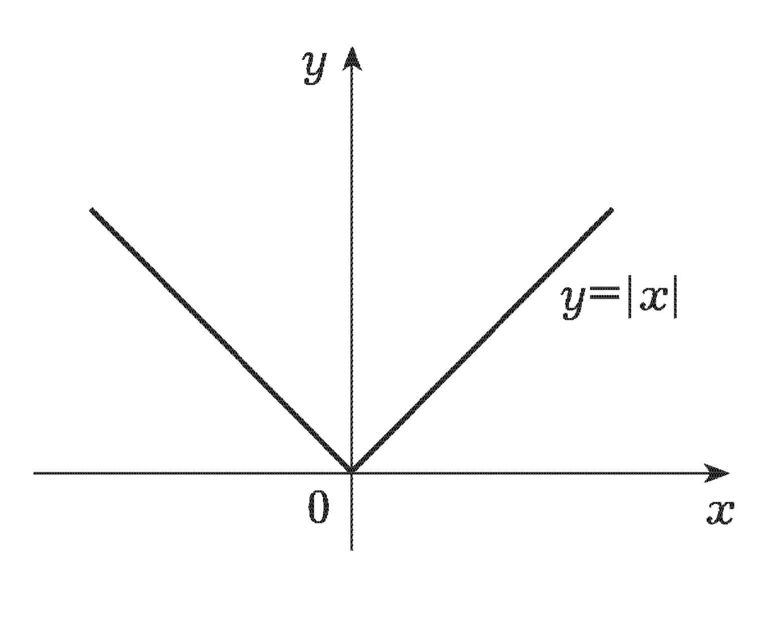


Рис. 9.4

Примеры. 1. Найти точки экстремума функции $f(x) = |x|$. Эта функция дифференцируема всюду на бесконечной прямой, кроме точки $x = 0$, и непрерывна в точке $x = 0$, причем производная $f'(x) = 1$ при $x > 0$ и равна -1 при $x < 0$.

Теорема 9.1 к этой функции неприменима, а согласно теореме 9.3 она имеет минимум при $x = 0$ (рис. 9.4).

2. Найти точки экстремума функции $y = x^{2/3}$. Эта функция непрерывна на всей бесконечной прямой и дифференцируема всюду на этой прямой, за исключением точки $x = 0$. Производ-

ная при $x \neq 0$ равна

$$y' = \frac{2}{3}\frac{1}{\sqrt[3]{x}}.$$

В предыдущем примере производная имела в точке $x = 0$ разрыв 1-го рода [1]; на этот раз производная имеет в точке $x = 0$ разрыв 2-го рода («бесконечный скачок»). Из выражения для производной следует, что эта производная отрицательна слева от точки $x = 0$ и положительна справа от этой точки. Стало быть, теорема 9.3 позволяет утверждать, что рассматриваемая функция имеет минимум в точке $x = 0$ (график рассматриваемой функции изображен на рис. 9.5).

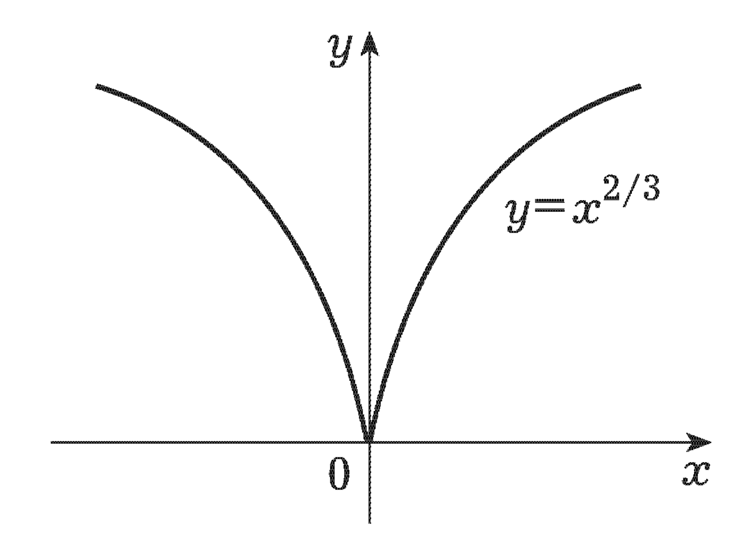


Рис. 9.5

3. Найти точки экстремума функции

$$y = f(x) = \begin{cases} \dfrac{x}{1+e^{1/x}} & \text{при} \quad x \neq 0, \\ 0 & \text{при} \quad x = 0. \end{cases}$$

Легко видеть, что эта функция непрерывна на всей бесконечной прямой. В самом деле, единственной «сомнительной» точкой является точка $x = 0$, но и в этой точке функция непрерывна, ибо

$$\lim_{x\to 0+0} y = \lim_{x\to 0-0} y = 0.$$

Далее, очевидно, что рассматриваемая функция дифференцируема на всей бесконечной прямой, кроме точки $x = 0$. Всюду, кроме этой точки, производная определяется формулой

$$y' = \frac{1 + e^{1/x} + \dfrac{1}{x}e^{1/x}}{\left(1 + e^{1/x}\right)^2}.$$

Легко видеть, что предел $\lim\limits_{x\to 0} \dfrac{f(x) - f(0)}{x} = \lim\limits_{x\to 0} \dfrac{1}{1 + e^{1/x}}$ не существует, так что функция $y = f(x)$ недифференцируема в точке $x = 0$. Поскольку производная y' положительна и слева, и справа от точки $x = 0$, рассматриваемая функция, согласно теореме 9.3, не имеет экстремума в точке $x = 0$, а стало быть, и вообще не имеет экстремумов. (График рассматриваемой функции изображен на рис. 9.6.)

---

[1] В том смысле, что эта производная хоть и не существовала в точке $x = 0$, но имела в этой точке конечные правое и левое предельные значения, не совпадающие между собой.

Переходим к общей схеме отыскания точек локального экстремума. Предположим, что функция $f(x)$ *непрерывна на интервале*[1] (a, b) *и ее производная* $f'(x)$ *существует и непрерывна на этом интервале всюду, кроме конечного числа точек.*

Кроме того, предположим, что *производная* $f'(x)$ *обращается в нуль на интервале* (a, b) *лишь в конечном числе точек.* Иными словами, мы предполагаем, что на интервале (a, b) имеется лишь конечное число точек, в которых производная $f(x)$ не существует или обращается в нуль. Обозначим эти точки символами $x_1, x_2, \ldots, x_n$ $(a < x_1 < x_2 < \ldots < x_n < b)$.

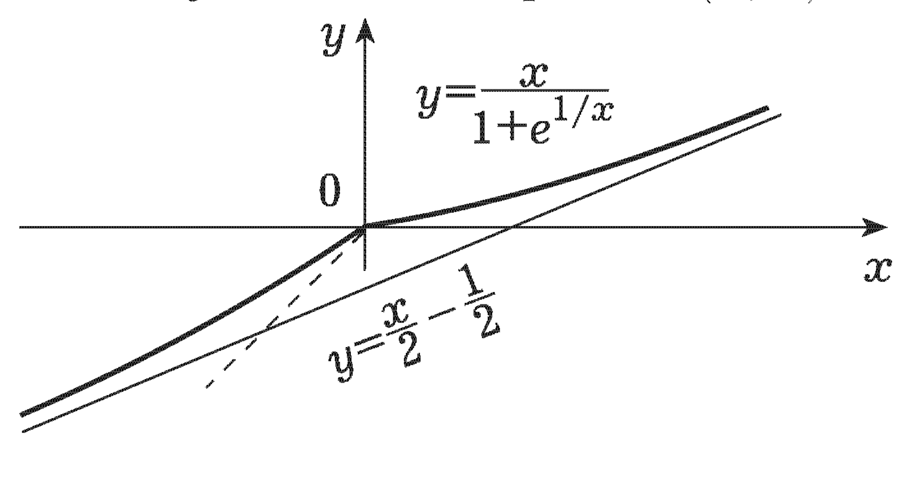


Рис. 9.6

В силу сделанных предположений производная $f'(x)$ *сохраняет постоянный знак* на каждом из интервалов (a, x_1), (x_1, x_2), ..., (x_n, b). Стало быть, *вопрос о наличии экстремума в каждой из точек* $x_1, x_2, \ldots, x_n$ *может быть решен (в утвердительном или отрицательном смысле) при помощи теоремы* 9.3.

Здесь мы не будем приводить примера, иллюстрирующего общую схему отыскания точек локального экстремума. Такой пример будет приведен нами в § 6.

§ 2. Направление выпуклости графика функции

Предположим, что функция $f(x)$ дифференцируема в любой точке интервала (a, b). Тогда, как установлено в п. 4 § 1 гл. 5, *существует касательная к графику функции* $y = f(x)$, *проходящая через любую точку* $M(x, f(x))$ *этого графика* $(a < x < b)$, *причем* эта касательная не параллельна[2] оси Oy.

Определение. Будем говорить, что *график функции* $y = f(x)$ *имеет на интервале* (a, b) *выпуклость, направленную вниз (вверх), если график этой функции в пределах указанного интервала лежит не ниже (не выше) любой своей касательной.*

З а м е ч а н и е 1. Термин «график лежит *не ниже* (или *не выше*) своей касательной» имеет смысл, ибо касательная не параллельна оси Oy.

На рис. 9.7 изображен график функции, имеющий на интервале (a, b) выпуклость, направленную вниз, а на рис. 9.8 изо-

[1]) Вместо интервала можно рассматривать полупрямую, бесконечную прямую и другое множество.

[2]) Ибо угловой коэффициент ее, равный производной $f'(x)$, *конечен.*

бражен график функции, имеющий выпуклость, направленную вверх.

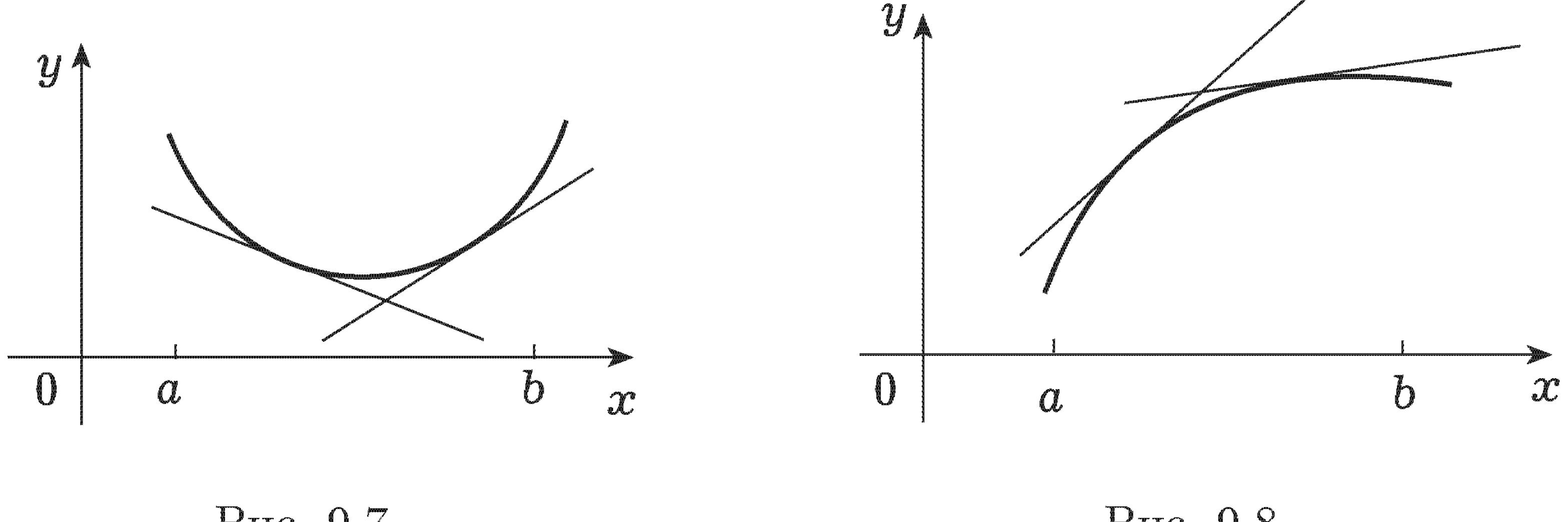


Рис. 9.7 Рис. 9.8

Теорема 9.4. *Если функция $y = f(x)$ имеет на интервале (a, b) конечную вторую производную и если эта производная неотрицательна (неположительна) всюду на этом интервале, то график функции $y = f(x)$ имеет на интервале (a, b) выпуклость, направленную вниз (вверх).*

Доказательство. Для определенности рассмотрим случай, когда вторая производная $f^{(2)}(x) \geqslant 0$ всюду на (a, b). Обозначим через c *любую* точку интервала (a, b) (рис. 9.9). Требуется доказать, что график функции $y = f(x)$ лежит не ниже касательной, проходящей через точку $M(c, f(c))$. Запишем уравнение указанной касательной, обозначая ее текущую ординату через Y. Поскольку угловой коэффициент указанной касательной равен $f'(c)$, ее уравнение имеет вид[1])

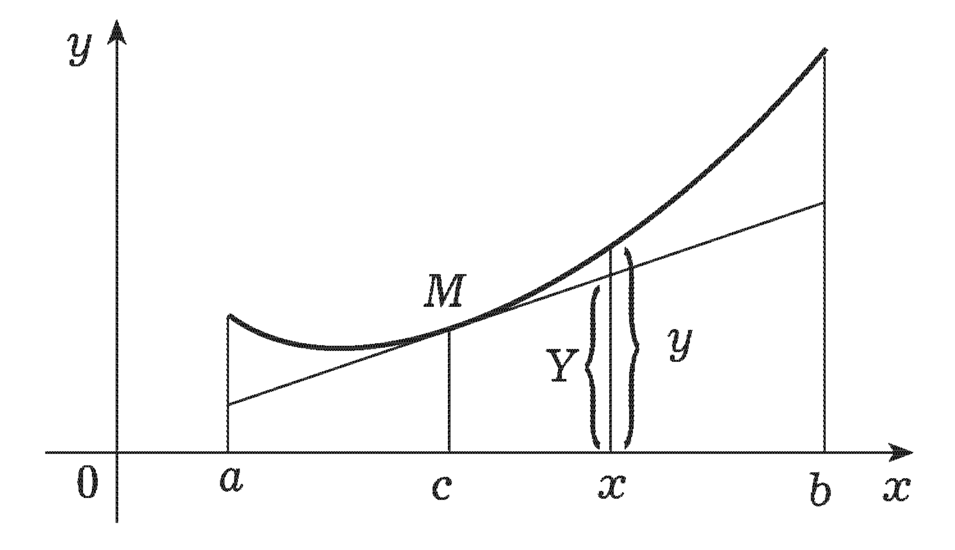


Рис. 9.9

$$Y - f(c) = f'(c)(x - c). \quad (9.5)$$

Разложим функцию $f(x)$ в окрестности точки c по формуле Тейлора, беря в этой формуле $n = 1$. Получим

$$y = f(x) = f(c) + \frac{f'(c)}{1!}(x - c) + \frac{f^{(2)}(\xi)}{2!}(x - c)^2, \quad (9.6)$$

где остаточный член взят в форме Лагранжа, ξ заключено между c и x. Поскольку по условию $f(x)$ имеет вторую производную на интервале (a, b), формула (9.6) справедлива для *любого* x из интервала (a, b) (см. § 13 гл. 8).

[1]) В выпуске 8 настоящего курса доказано, что уравнение прямой, проходящей через точку $M(a, b)$ и имеющей угловой коэффициент k, имеет вид $Y - b = k(x - a)$.

Сопоставляя (9.6) и (9.5), будем иметь

$$y - Y = \frac{f^{(2)}(\xi)}{2}(x-c)^2. \tag{9.7}$$

Поскольку вторая производная по условию $\geqslant 0$ всюду на (a,b), то правая часть (9.7) *неотрицательна*, т. е. для всех x из (a,b) $y - Y \geqslant 0$ или $y \geqslant Y$.

Последнее неравенство доказывает, что график функции $y = f(x)$ всюду в пределах интервала (a,b) лежит не ниже касательной (9.5).

Аналогично доказывается теорема для случая $f^{(2)}(x) \leqslant 0$.

Замечание 2. Если всюду на интервале (a,b) $f^{(2)}(x) = 0$, то, как легко убедиться, $y = f(x)$ — линейная функция, т. е. график ее есть прямая линия. В этом случае направление выпуклости можно считать произвольным.

Теорема 9.5. *Пусть вторая производная функции $y = f(x)$ непрерывна и положительна (отрицательна) в точке c. Тогда существует такая окрестность точки c, в пределах которой график функции $y = f(x)$ имеет выпуклость, направленную вниз (вверх).*

Доказательство. По теореме 8.4 об устойчивости знака непрерывной функции найдется такая окрестность точки c, в пределах которой вторая производная $f^{(2)}(x)$ положительна (отрицательна). По предыдущей теореме график функции $y = f(x)$ имеет в пределах этой окрестности выпуклость, направленную вниз (вверх).

Таким образом, *направление выпуклости графика функции полностью характеризуется знаком второй производной этой функции.*

Пример. Исследовать направление выпуклости графика функции $y = f(x) = x^3 - 3x^2 - 4$. Эту функцию, мы уже рассматривали в пп. 1 и 4 предыдущего параграфа (см. рис. 9.1). Из вида второй производной $f^{(2)}(x) = 6x - 6 = 6(x-1)$ вытекает, что эта производная отрицательна при $x < 1$ и положительна при $x > 1$. Таким образом, выпуклость графика функции $y = x^3 - 3x^2 - 4$ направлена вверх на участке $(-\infty, 1)$ и вниз на участке $(1, \infty)$.

§ 3. Точки перегиба графика функции

1. Определение точки перегиба. Необходимое условие перегиба. Пусть a, b и c — некоторые три числа, связанные неравенствами $a < c < b$. Предположим, что функция $y = f(x)$ дифференцируема на интервале (a,b), т. е. существует касательная к графику этой функции во всех точках, абсциссы которых принадлежат интервалу (a,b). Предположим, кроме того, что

график функции $y = f(x)$ имеет определенное направление выпуклости на каждом из интервалов (a, c) и (c, b).

Определение. *Точка $M(c, f(c))$ графика функции $y = f(x)$ называется т о ч к о й п е р е г и б а этого графика, если существует такая окрестность точки c оси абсцисс, в пределах которой график функции $y = f(x)$ слева и справа от c имеет разные направления выпуклости.*

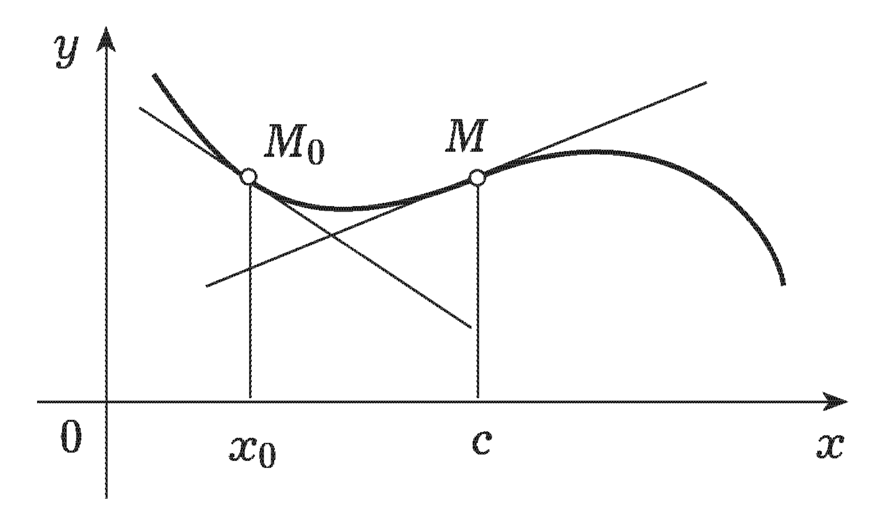


Рис. 9.10

На рис. 9.10 изображен график функции, имеющий перегиб в точке $M(c, f(c))$.

Иногда при определении точки перегиба графика функции $y = f(x)$ дополнительно требуется, чтобы *указанный график всюду в пределах достаточно малой окрестности точки c оси абсцисс слева и справа от c лежал по разные стороны от касательной к этому графику в точке $M(c, f(c))$.* Ниже мы докажем, что это свойство будет вытекать из данного нами определения в предположении, что производная $f'(x)$ является непрерывной в точке c.

Докажем следующие две леммы.

Лемма 1. *Пусть функция $y = f(x)$ имеет производную $f'(x)$ всюду в δ-окрестности точки c, причем эта производная непрерывна в точке c. Тогда, если график функции $y = f(x)$ имеет на интервале $(c, c + \delta)$ выпуклость, направленную вниз (вверх), то всюду в пределах интервала $(c, c + \delta)$ этот график лежит не ниже (не выше) касательной к графику, проведенной в точке $M(c, f(c))$.*

Д о к а з а т е л ь с т в о. Рассмотрим последовательность $\{x_n\}$ точек интервала $(c, c+\delta)$, сходящуюся к точке c. Через каждую точку $M_n(x_n, f(x_n))$ графика функции $y = f(x)$ проведем касательную к этому графику, т. е. прямую [1]

$$Y_n = f(x_n) + f'(x_n)(x - x_n).$$

Так как по условию график функции $y = f(x)$ имеет на интервале $(c, c + \delta)$ выпуклость, направленную вниз (вверх), то для любого номера n и любой ф и к с и р о в а н н о й точки x интервала $(c, c + \delta)$ имеем

$$f(x) - Y_n = f(x) - f(x_n) - f'(x_n)(x - x_n) \geqslant 0 \quad (\leqslant 0). \qquad (*)$$

[1] Мы используем уравнение прямой, проходящей через данную точку $M_n(x_n, f(x_n))$ и имеющей угловой коэффициент, равный $f'(x_n)$. Текущую ординату этой прямой обозначаем через Y_n.

Из условия непрерывности $f'(x)$ (и тем более $f(x)$) в точке c и из определения непрерывности из п. 1 § 3 гл. 4 вытекает, что существует предел

$$\lim_{n\to\infty}(f(x)-Y_n)=\lim_{n\to\infty}\{f(x)-f(x_n)-f'(x_n)(x-x_n)\}=$$
$$=f(x)-f(c)-f'(c)(x-c).$$

Из существования последнего предела в силу неравенства $(*)$ и теоремы 3.13 из § 1 гл. 3 получим, что

$$f(x)-f(c)-f'(c)(x-c)\geqslant 0 \quad (\leqslant 0).$$

Если обозначить через Y текущую ординату касательной (9.5), проходящей через точку $M(c,f(c))$, то последнее неравенство можно переписать в виде: $f(x)-Y\geqslant 0$ $(\leqslant 0)$.

Итак, переходя в неравенстве $(*)$ к пределу при $n\to\infty$ и используя теорему 3.13 из гл. 3, мы получим, что

$$f(x)-Y\geqslant 0 \quad (\leqslant 0)$$

для любой фиксированной точки x из интервала $(c,c+\delta)$, причем Y обозначает текущую ординату касательной, проведенной через точку $M(c,f(c))$. Лемма доказана.

З а м е ч а н и е. Аналогично формулируется и доказывается лемма 1 и для случая, когда график функции имеет определенное направление выпуклости не на интервале $(c,c+\delta)$, а на интервале $(c-\delta,c)$.

Лемма 2. *Пусть функция $y=f(x)$ имеет производную $f'(x)$ в некоторой окрестности точки c, причем эта производная непрерывна в точке c. Тогда, если график функции $y=f(x)$ имеет перегиб в точке $M(c,f(c))$, то в пределах достаточно малой δ-окрестности точки c этот график слева и справа от c лежит по разные стороны от касательной, проведенной через точку $M(c,f(c))$.*

Для д о к а з а т е л ь с т в а этой леммы следует выбрать $\delta>0$ настолько малым, чтобы на каждом из интервалов $(c-\delta,c)$ и $(c,c+\delta)$ график функции $y=f(x)$ имел определенное направление выпуклости (это направление будет различным на интервалах $(c-\delta,c)$ и $(c,c+\delta)$). После этого для доказательства леммы 2 остается применить лемму 1 к функции $y=f(x)$ по каждому из интервалов $(c-\delta,c)$ и $(c,c+\delta)$.

Лемма 2 позволяет нам установить необходимое условие перегиба графика дважды дифференцируемой в данной точке функции.

Теорема 9.6 (необходимое условие перегиба графика дважды дифференцируемой функции). *Если функция $y=f(x)$ имеет в точке c вторую производную и график этой функции имеет перегиб в точке $M(c,f(c))$, то $f^{(2)}(c)=0$.*

Доказательство. Пусть, как и выше, Y — текущая ордината касательной $Y = f(c) + f'(c)(x - c)$, проходящей через точку графика $M(c, f(c))$.

Рассмотрим функцию

$$F(x) = f(x) - Y = f(x) - f(c) - f'(c)(x - c),$$

равную разности $f(x)$ и линейной функции $f(c) + f'(c)(x - c)$.

Эта функция $F(x)$, как и функция $f(x)$, имеет в точке c вторую производную (а потому имеет первую производную в некоторой окрестности c, причем эта первая производная непрерывна в точке c). В силу леммы 2 в малой окрестности точки c график функции $y = f(x)$ лежит слева и справа от c по разные стороны от касательной, проходящей через точку $M(c, f(c))$, а следовательно, функция $F(x)$ в малой окрестности точки c имеет слева и справа от c разные знаки.

Стало быть, *функция $F(x)$ не может иметь в точке c локального экстремума.*

Предположим теперь, что $f^{(2)}(c) \neq 0$. Тогда, поскольку $F'(x) = f'(x) - f'(c)$, $F^{(2)}(x) = f^{(2)}(x)$, выполняются условия $F'(c) = 0$, $F^{(2)}(c) \neq 0$ и функция $F(x)$ в силу теоремы 9.2 имеет в точке c локальный экстремум. Полученное противоречие доказывает, что предположение $f^{(2)}(c) \neq 0$ является неверным, т. е. $f^{(2)}(c) = 0$. Теорема доказана.

Тот факт, что обращение в нуль второй производной является лишь необходимым условием перегиба графика дважды дифференцируемой функции, вытекает, например, из рассмотрения графика функции $y = x^4$. Для этой функции вторая производная $y^{(2)} = 12x^2$ обращается в нуль в точке $x = 0$, но ее график не имеет перегиба в точке $M(0, 0)$.

В силу теоремы 9.6 для отыскания всех точек перегиба графика дважды дифференцируемой функции $y = f(x)$ нужно рассмотреть все корни уравнения $f^{(2)}(x) = 0$.

Поскольку равенство нулю второй производной является лишь необходимым условием перегиба, то нужно дополнительно исследовать вопрос о наличии перегиба в каждой точке, для которой $f^{(2)}(x) = 0$. Для проведения такого исследования следует установить достаточные условия перегиба, к чему мы и переходим.

2. Первое достаточное условие перегиба.

Теорема 9.7. *Пусть функция $y = f(x)$ имеет вторую производную в некоторой окрестности точки c и $f^{(2)}(c) = 0$. Тогда, если в пределах указанной окрестности вторая производная $f^{(2)}(x)$ имеет разные знаки слева и справа от c, то график этой функции имеет перегиб в точке $M(c, f(c))$.*

Доказательство. Заметим, во-первых, что график функции $y = f(x)$ имеет касательную в точке $M(c, f(c))$, ибо из условий теоремы вытекает существование конечной производной $f'(c)$. Далее, из того, что $f^{(2)}(x)$ слева и справа от c имеет разные знаки, и из теоремы 9.4 заключаем, что направление выпуклости слева и справа от c является различным. Теорема доказана.

Пример. Найти точки перегиба графика функции $y = x^3 - 3x^2 - 4$. Эту функцию мы неоднократно рассматривали выше (график ее изображен на рис. 9.1). Поскольку $f^{(2)}(x) = 6x - 6 = 6(x - 1)$, то единственное значение аргумента, для которого возможен перегиб, есть $x = 1$. Этому значению аргумента соответствует точка графика $M(1, -6)$. Так как $f^{(2)}(x)$ имеет разные знаки при $x > 1$ и при $x < 1$, то точка $M(1, -6)$ является точкой перегиба графика рассматриваемой функции.

3. Второе достаточное условие перегиба. На случай, когда нежелательно исследование знака второй производной в окрестности точки c, мы сформулируем второе достаточное условие перегиба, предполагающее существование у функции $y = f(x)$ в точке c конечной третьей производной.

Теорема 9.8. *Если функция $y = f(x)$ имеет в точке c конечную третью производную и удовлетворяет в этой точке условиям $f^{(2)}(c) = 0$, $f^{(3)}(c) \neq 0$, то график этой функции имеет перегиб в точке $M(c, f(c))$.*

Доказательство. Из условия $f^{(3)}(c) \neq 0$ и из теоремы 8.9 вытекает, что функция $f^{(2)}(x)$ либо возрастает, либо убывает в точке c. Так как $f^{(2)}(c) = 0$, то и в том, и в другом случае найдется такая окрестность точки c, в пределах которой $f^{(2)}(x)$ имеет *разные знаки слева и справа от* c. Но тогда по предыдущей теореме график функций $y = f(x)$ имеет перегиб в точке $M(c, f(c))$.

Замечание. Конечно, теорема 9.8 имеет более узкую сферу действия, чем теорема 9.7. Так, теорема 9.8 не решает вопроса о наличии перегиба для случая, когда у функции $y = f(x)$ не существует конечной третьей производной, а также для случая, *когда* $f^{(3)}(c) = 0$. В последнем случае для решения вопроса о наличии перегиба нужно изучить поведение в точке c производных высших порядков, что будет сделано нами в § 4 этой главы.

Возвратимся к примеру, рассмотренному в предыдущем пункте, и покажем, что вопрос о наличии перегиба у графика функции $y = x^3 - 3x^2 - 4$ может быть решен и при помощи теоремы 9.8. В самом деле, $f^{(3)}(x) = 6 \neq 0$, стало быть, точка $M(1, -6)$ является точкой перегиба, согласно теореме 9.8.

4. Некоторые обобщения первого достаточного условия перегиба. Прежде всего, заметим, что в условиях теоремы 9.7 можно отказаться от требования двукратной дифференцируемости функции $y = f(x)$ *в самой точке* c, сохраняя это требование лишь для точек, лежащих в некоторой окрестности слева и справа от c. При этом следует дополнительно предположить существование конечной производной $f'(c)$.

Доказательство теоремы 9.7 с указанными изменениями дословно совпадает с доказательством, приведенным выше.

Далее, можно договориться при определении точки перегиба не исключать случая, когда касательная к графику в рассматриваемой точке *параллельна* оси Oy [1]). При такой договоренности в теореме 9.7 можно отказаться даже от требования однократной дифференцируемости функции $f(x)$ в самой точке c и сформулировать эту теорему следующим образом.

Пусть функция $y = f(x)$ имеет конечную вторую производную всюду в некоторой окрестности точки c, за исключением, быть может, самой точки c. Пусть, далее, функция $y = f(x)$ непрерывна в точке c и график этой функции имеет касательную [2]) в точке $M(c, f(c))$. Тогда, если в пределах указанной окрестности вторая производная $f^{(2)}(x)$ имеет разные знаки слева и справа от точки c, то график функции $y = f(x)$ имеет перегиб в точке $M(c, f(c))$.

Доказательство сформулированного утверждения полностью аналогично доказательству теоремы 9.7.

П р и м е р. Найти точки перегиба графика функции $y = x^{1/3}$. Эта функция имеет вторую производную всюду на бесконечной прямой, за исключением точки $x = 0$. В точке $x = 0$ рассматриваемая функция непрерывна, но уже первая производная обращается в бесконечность. Однако график функции $y = x^{1/3}$ имеет в точке $(0, 0)$ касательную, параллельную оси Oy [3]) (рис. 9.11). Так как вторая производная

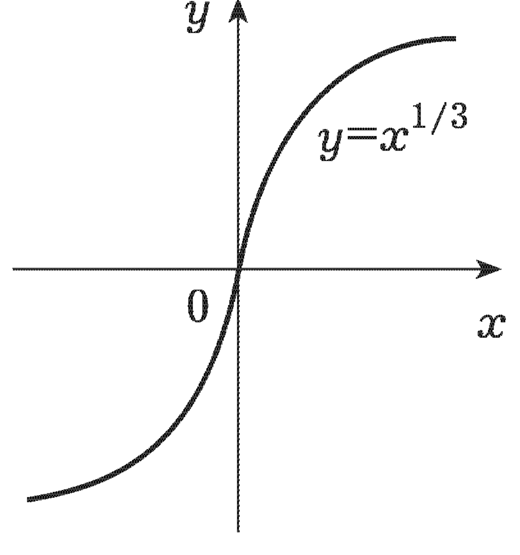


Рис. 9.11

$$y^{(2)} = -\frac{2}{9}\frac{1}{x^{5/3}}$$

имеет слева и справа от точки $x = 0$ разные знаки, то график функции $y = x^{1/3}$ имеет перегиб в точке $(0, 0)$.

§ 4. Третье достаточное условие экстремума и перегиба

Теорема 9.9. *Пусть $n \geqslant 1$ — целое число и пусть функция $y = f(x)$ имеет производную порядка n в некоторой окрестности точки c и производную порядка $n+1$ в самой точке c. Пусть, далее, справедливы следующие соотношения:*

$$f^{(2)}(c) = f^{(3)}(c) = \ldots = f^{(n)}(c) = 0, \quad f^{(n+1)}(c) \neq 0. \qquad (9.8)$$

[1]) Этот случай соответствует бесконечному значению $f'(c)$.

[2]) Хотя бы параллельную оси Oy.

[3]) Это вытекает, например, из того, что график обратной функции $x = y^3$ имеет в этой точке касательную $x = 0$.

Тогда, если n является четным числом, график функции $y = f(x)$ имеет перегиб в точке $M(c, f(c))$. Если же n является нечетным числом и, кроме того, $f'(c) = 0$, функция $y = f(x)$ имеет локальный экстремум в точке c, точнее, имеет в точке c локальный минимум при $f^{(n+1)}(c) > 0$ и локальный максимум при $f^{(n+1)}(c) < 0$.

Доказательство. 1) Пусть сначала n является четным числом. При $n = 2$ доказываемая теорема совпадает с уже доказанной теоремой 9.8, так что нужно провести доказательство только для четного $n \geqslant 4$.

Пусть четное n удовлетворяет условию $n \geqslant 4$. Из условия $f^{(n+1)}(c) \neq 0$ и из теоремы 8.9, примененной к функции $f^{(n)}(x)$, вытекает, что эта функция $f^{(n)}(x)$ либо возрастает, либо убывает в точке c. Поскольку, кроме того, $f^{(n)}(c) = 0$, то и в том, и в другом случае *найдется достаточно малая окрестность точки c, в пределах которой $f^{(n)}(x)$ справа и слева от c имеет разные знаки.*

Заметив это, разложим функцию $f^{(2)}(x)$ в окрестности точки c по формуле Тейлора с остаточным членом в форме Лагранжа. Мы получим, что для всех x из достаточно малой окрестности точки c между c и x найдется точка ξ такая, что

$$f^{(2)}(x) = f^{(2)}(c) + \frac{f^{(3)}(c)}{1!}(x-c) + \ldots$$
$$\ldots + \frac{f^{(n-1)}(c)}{(n-3)!}(x-c)^{n-3} + \frac{f^{(n)}(\xi)}{(n-2)!}(x-c)^{n-2}.$$

Соотношения (9.8) позволяют придать последнему равенству следующий вид:

$$f^{(2)}(x) = \frac{f^{(n)}(\xi)}{(n-2)!}(x-c)^{n-2}. \tag{9.9}$$

Так как в пределах достаточно малой окрестности точки c функция $f^{(n)}(x)$ имеет разные знаки при $x < c$ и при $x > c$ и так как ξ всегда лежит между c и x, то мы получим, что и $f^{(n)}(\xi)$ (а, в силу четности n, и вся правая часть (9.9)) имеет разные знаки при $x < c$ и при $x > c$. Но тогда и левая часть (9.9), т. е. $f^{(2)}(x)$ в пределах достаточно малой окрестности c имеет разные знаки при $x < c$ и при $x > c$. В силу теоремы 9.7 это означает, что график функции $y = f(x)$ имеет перегиб в точке $M(c, f(c))$, и для случая четного n теорема доказана.

2) Пусть теперь $n \geqslant 1$ является нечетным числом и дополнительно предполагается, что $f'(c) = 0$. Так как при $n = 1$ доказываемая нами теорема совпадает с уже доказанной выше тео-

ремой 9.2, то достаточно провести доказательство для нечетного $n \geqslant 3$.

Пусть нечетное n удовлетворяет условию $n \geqslant 3$. Ради определенности, проведем рассуждения для случая $f^{(n+1)}(c) > 0$, ибо для случая $f^{(n+1)}(c) < 0$ они проводятся аналогично.

Из условия $f^{(n+1)}(c) > 0$ и из теоремы 8.9, примененной к функции $f^{(n)}(x)$, вытекает, что эта функция $f^{(n)}(x)$ возрастает в точке c. Поскольку, кроме того, $f^{(n)}(c) = 0$, то это означает, что *найдется достаточно малая окрестность точки c, в пределах которой $f^{(n)}(x)$ отрицательна слева от c и положительна справа от c.*

Заметив это, разложим функцию $f'(x)$ в окрестности точки c по формуле Тейлора с остаточным членом в форме Лагранжа. Мы получим, что для всех x из достаточно малой окрестности точки c между c и x найдется точка ξ такая, что

$$f'(x) = f'(c) + \frac{f^{(2)}(c)}{1!}(x-c) + \ldots \\ \ldots + \frac{f^{(n-1)}(c)}{(n-2)!}(x-c)^{n-2} + \frac{f^{(n)}(\xi)}{(n-1)!}(x-c)^{n-1}. \quad (9.10)$$

Соотношения (9.8) и дополнительное условие $f'(c) = 0$ позволяют переписать равенство (9.10) в виде

$$f'(x) = \frac{f^{(n)}(\xi)}{(n-1)!}(x-c)^{n-1}. \quad (9.11)$$

Так как ξ всегда лежит между c и x, то для всех x из достаточно малой окрестности точки c производная $f^{(n)}(\xi)$ отрицательна при $x < c$ и положительна при $x > c$. При нечетном n число $n-1$ является четным, а поэтому вся правая (а, стало быть, и левая) часть (9.11) для всех x из достаточно малой окрестности c отрицательна слева от c и положительна справа от c.

На основании теоремы 9.1 это означает, что функция $f(x)$ имеет локальный минимум в точке c. Итак, для случая $f^{(n+1)}(c) > 0$ вторая часть теоремы доказана. Так как случай $f^{(n+1)}(c) < 0$ рассматривается совершенно аналогично, то теорема полностью доказана.

Пример. Исследовать на экстремум и перегиб функцию $f(x) = (x-c)^{n+1}$. Легко видеть, что $f'(c) = f^{(2)}(c) = \ldots$ $\ldots = f^{(n)}(c) = 0$, $f^{(n+1)}(c) = (n+1)! > 0$. Согласно теореме 9.9 при *четном* $(n+1)$ функция имеет минимум в точке $x = c$ (рис. 9.12), а при *нечетном* $(n+1)$ график функции имеет перегиб в точке $M(c, 0)$ (рис. 9.13).

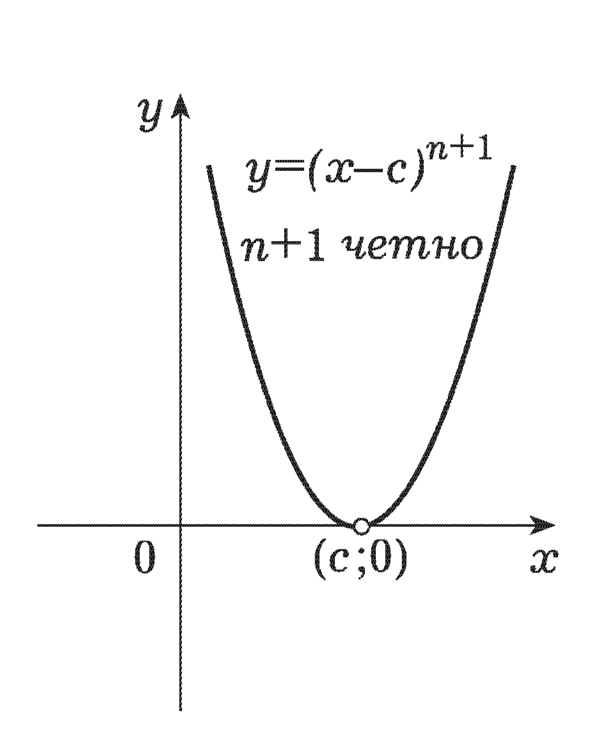


Рис. 9.12

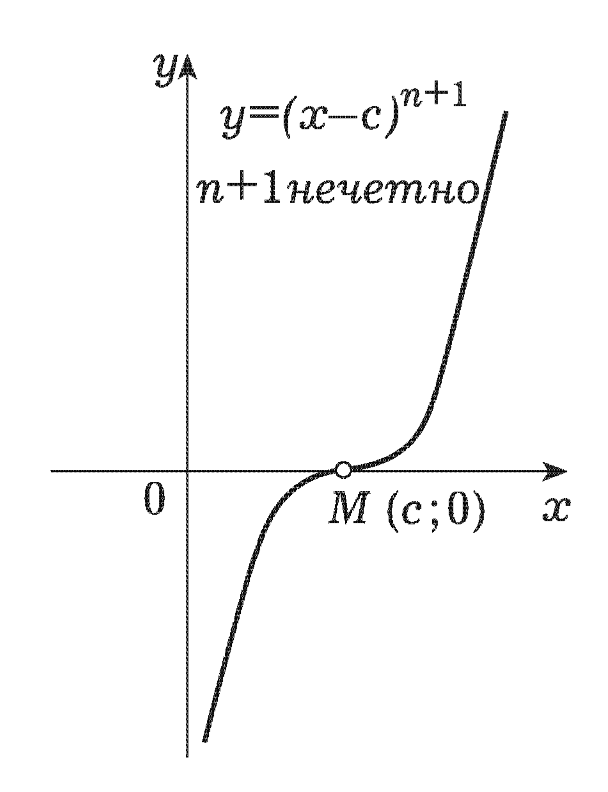


Рис. 9.13

§ 5. Асимптоты графика функции

Определение 1. Говорят, что *прямая* $x = a$ *является* *в е р т и к а л ь н о й   а с и м п т о т о й* *графика функции* $y = f(x)$, *если хотя бы одно из предельных значений*

$$\lim_{x\to a+0} f(x) \quad \text{или} \quad \lim_{x\to a-0} f(x)$$

равно $+\infty$ *или* $-\infty$.

П р и м е р. График функции $y = \dfrac{1}{x}$ имеет вертикальную асимптоту $x = 0$, ибо $\lim\limits_{x\to 0+0} \dfrac{1}{x} = +\infty$, $\lim\limits_{x\to 0-0} \dfrac{1}{x} = -\infty$ (рис. 9.14).

Предположим далее, что функция $y = f(x)$ определена для сколь угодно больших значений аргумента. Ради определенности будем рассматривать сколь угодно большие значения *положительного* знака.

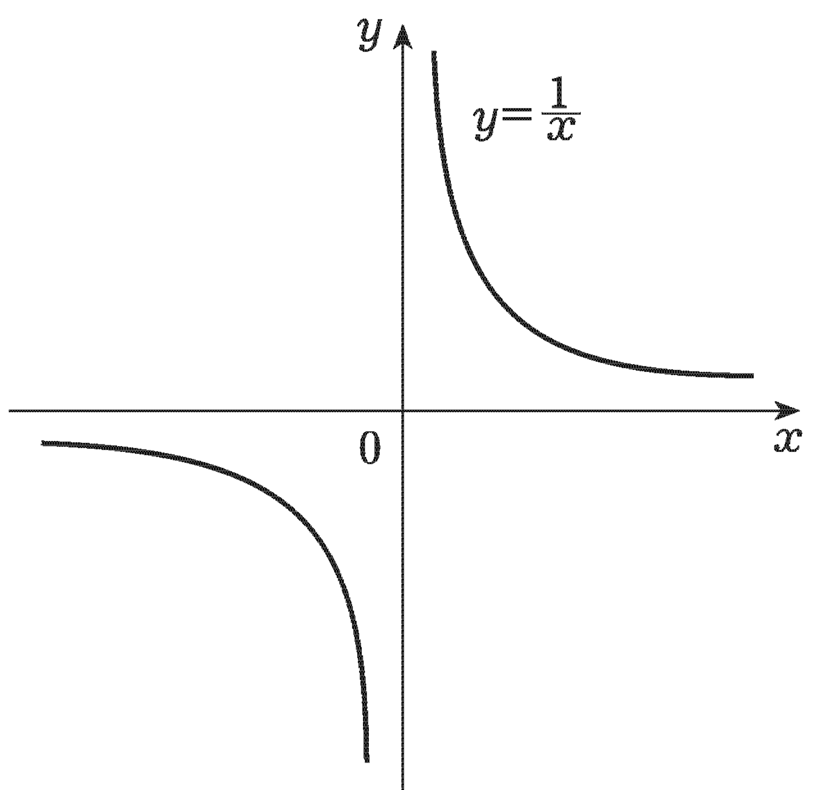


Рис. 9.14

Определение 2. Говорят, что *прямая*

$$Y = kx + b \tag{9.12}$$

является *н а к л о н н о й   а с и м п т о т о й* *графика функции* $y = f(x)$ *при* $x \to +\infty$, *если функция* $f(x)$ *представима в виде*

$$f(x) = kx + b + \alpha(x), \tag{9.13}$$

где $\lim\limits_{x\to+\infty} \alpha(x) = 0$.

Теорема 9.10. *Для того чтобы график функции $y = f(x)$ имел при $x \to +\infty$ наклонную асимптоту (9.12), необходимо и достаточно, чтобы существовали два предельных значения*

$$\lim_{x\to+\infty} \frac{f(x)}{x} = k \qquad \text{и} \qquad \lim_{x\to+\infty}[f(x) - kx] = b. \tag{9.14}$$

Доказательство. 1) Необходимость. Пусть график функции $y = f(x)$ имеет при $x = +\infty$ асимптоту (9.12), т. е. для $f(x)$ справедливо представление (9.13). Тогда

$$\lim_{x\to+\infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x\to+\infty} \frac{kx + b + \alpha(x)}{x} = \lim_{x\to+\infty} \left[k + \frac{b}{x} + \frac{\alpha(x)}{x}\right] = k,$$

$$\lim_{x\to+\infty}[f(x) - kx] = \lim_{x\to+\infty}[b + \alpha(x)] = b.$$

2) Достаточность. Пусть существуют предельные значения (9.14). Второе из этих предельных значений дает право утверждать, что разность $f(x) - kx - b$ является бесконечно малой при $x \to + \infty$. Обозначив эту бесконечно малую через $\alpha(x)$, получим для $f(x)$ представление (9.13). Теорема доказана.

Замечание. Аналогично определяется наклонная асимптота и доказывается теорема 9.10 и для случая $x \to -\infty$.

Пример. График функции $y = \dfrac{2x^2 + x}{x+1} = 2x - 1 + \dfrac{1}{x+1}$ имеет наклонную асимптоту $Y = 2x - 1$ и при $x \to +\infty$, и при $x \to -\infty$ и, кроме того, имеет вертикальную асимптоту $x = -1$ (рис. 9.15). В самом деле,

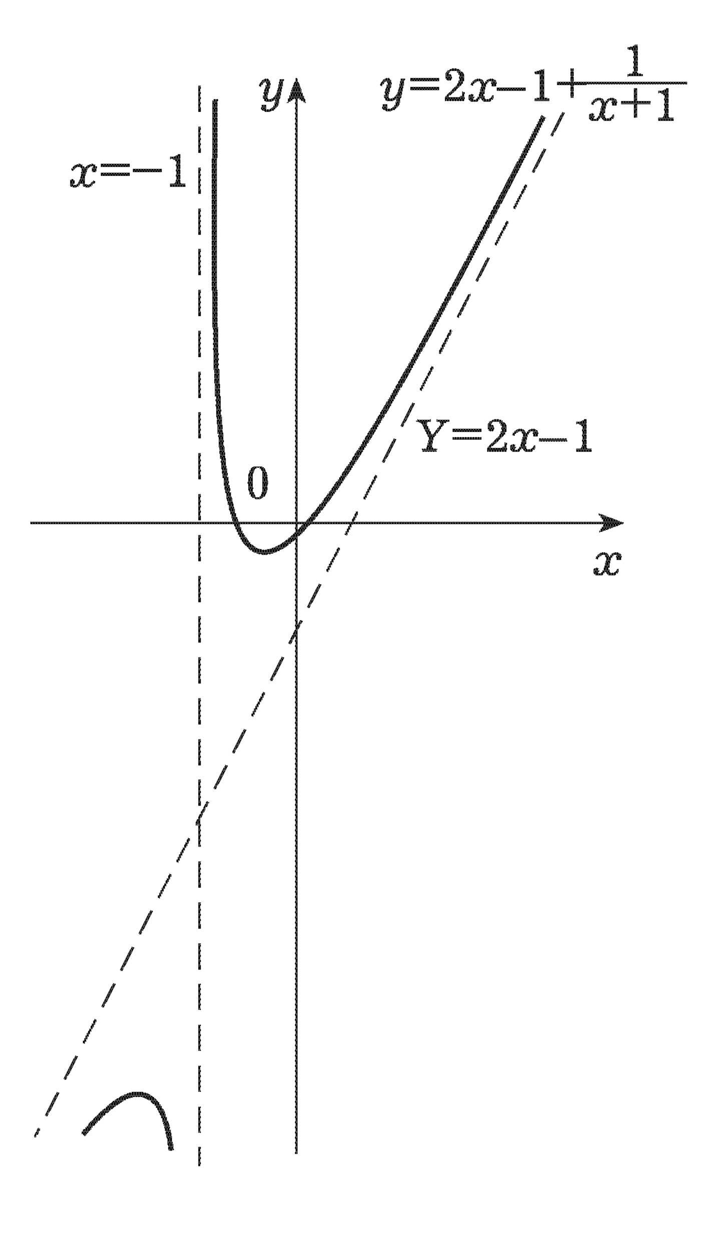


Рис. 9.15

$$\lim_{x\to\pm\infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x\to\pm\infty} \frac{2x^2 + x}{x(x+1)} = 2,$$

$$\lim_{x\to\pm\infty}[f(x) - 2x] = \lim_{x\to\pm\infty}\left[-1 + \frac{1}{x+1}\right] = -1,$$

$$\lim_{x\to-1+0} f(x) = +\infty, \qquad \lim_{x\to-1-0} f(x) = -\infty.$$

Наряду с линейной асимптотой (9.12) рассматривают также и асимптоты более сложного вида.

Говорят, что парабола n-го порядка, определяемая многочленом

$$Y = a_n x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \ldots + a_1 x + a_0, \tag{9.12*}$$

является *асимптотой графика функции* $y = f(x)$ *при* $x \to +\infty$, если функция $f(x)$ представима в виде $f(x) = a_n x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \ldots + a_1 x + a_0 + \alpha(x)$, где $\lim\limits_{x\to+\infty} \alpha(x) = 0$. Легко доказать следующее утверждение.

Для того чтобы график функции $y = f(x)$ *имел при* $x \to +\infty$ *асимптоту* (9.12*), *необходимо и достаточно, чтобы существовали следующие* $n+1$ *предельных значений:*

$$\lim_{x\to+\infty} \frac{f(x)}{x^n} = a_n, \quad \lim_{x\to+\infty} \frac{f(x) - a_n x^n}{x^{n-1}} = a_{n-1}, \ldots$$

$$\ldots, \lim_{x\to+\infty} \frac{f(x) - (a_n x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \ldots + a_2 x^2)}{x} = a_1,$$

$$\lim_{x\to+\infty} [f(x) - (a_n x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \ldots + a_1 x)] = a_0.$$

§ 6. Схема исследования графика функции

В этом параграфе мы изложим схему, по которой целесообразно проводить исследование графика функции, и приведем пример, иллюстрирующий эту схему.

Для качественного исследования графика функции $y = f(x)$ целесообразно прежде всего провести следующие исследования:

1°. Уточнить область задания функции.

2°. Выяснить вопрос о существовании асимптот (вертикальных и наклонных).

3°. Найти области возрастания и убывания функции и точки экстремума.

4°. Найти области сохранения направления выпуклости и точки перегиба.

5°. Найти точки пересечения графика функции с осью Ox.

По полученным данным легко строится эскиз графика функции. В качестве примера построим график функции

$$y = \frac{2x^3 - 5x^2 + 14x - 6}{4x^2}. \tag{9.15}$$

Будем следовать изложенной выше схеме.

1°. Поскольку функция (9.15) представляет собой рациональную дробь, то она определена и непрерывна всюду на бесконечной прямой, кроме точки $x = 0$, в которой обращается в нуль знаменатель.

2°. Выясним вопрос о существовании асимптот. Очевидно, что

$$\lim_{x\to 0\pm 0} \frac{2x^3 - 5x^2 + 14x - 6}{4x^2} = -\infty,$$

поэтому график функции имеет *вертикальную асимптоту* $x =$

$= 0$. Далее, из существования пределов

$$\lim_{x\to\pm\infty}\frac{f(x)}{x} = \lim_{x\to\pm\infty}\frac{2x^3-5x^2+14x-6}{4x^3} = \lim_{x\to\pm\infty}\frac{2-\dfrac{5}{x}+\dfrac{14}{x^2}-\dfrac{6}{x^3}}{4} = \frac{1}{2},$$

$$\lim_{x\to\pm\infty}\left[f(x)-\frac{x}{2}\right] = \lim_{x\to\pm\infty}\frac{2x^3-5x^2+14x-6-2x^3}{4x^2} =$$

$$= \lim_{x\to\pm\infty}\frac{-5+\dfrac{14}{x}-\dfrac{6}{x^2}}{4} = -\frac{5}{4}$$

вытекает, что и при $x\to+\infty$, и при $x\to-\infty$ график функции имеет *наклонную асимптоту* $Y=\dfrac{x}{2}-\dfrac{5}{4}$.

3°. Для нахождения областей возрастания и убывания вычислим первую производную функции (9.15)

$$y' = \frac{x^3-7x+6}{2x^3} = \frac{(x-1)(x-2)(x+3)}{2x^3}.$$

Имея в виду, кроме того, что сама функция и первая производная не существуют при $x=0$, мы получим следующие области сохранения знака y':

Область значений x	$-\infty < x < -3$	$-3 < x < 0$	$0 < x < 1$	$1 < x < 2$	$2 < x < \infty$
Знак y'	$+$	$-$	$+$	$-$	$+$
Поведение функции	возрастает	убывает	возрастает	убывает	возрастает

Из приведенной таблицы очевидно, что функция имеет следующие точки экстремума:

1) максимум при $x=-3$, причем $f(-3)=-49/12$,
2) максимум при $x=1$, причем $f(1)=5/4$,
3) минимум при $x=2$, причем $f(2)=9/8$.

4°. Для нахождения областей сохранения направления выпуклости вычислим вторую производную

$$y^{(2)} = \frac{7x-9}{x^4} = \frac{7\left(x-\dfrac{9}{7}\right)}{x^4}.$$

Имея в виду, что сама функция и ее производные не существуют в точке $x=0$, мы получим следующие области сохранения знака $y^{(2)}$:

Область значений x	$-\infty < x < 0$	$0 < x < 9/7$	$9/7 < x < \infty$
Знак $y^{(2)}$	$-$	$-$	$+$
Направление выпуклости графика	вверх	вверх	вниз

Из приведенной таблицы очевидно, что график функции имеет перегиб в точке $(9/7, f(9/7))$. Легко подсчитать, что $f(9/7) = 913/756$.

5°. Остается найти точки пересечения графика с осью Ox. Эти точки соответствуют вещественным корням уравнения

$$2x^3 - 5x^2 + 14x - 6 = 0.$$

Легко видеть, что $2x^3 - 5x^2 + 14x - 6 = 2\left(x - \frac{1}{2}\right)(x^2 - 2x + 6)$. Поскольку квадратный трехчлен $(x^2 - 2x + 6)$ имеет комплексные корни, то рассматриваемое уравнение имеет только один вещественный корень $x = 1/2$, так что график функции пересекает ось Ox в точке $(1/2, 0)$. По полученным данным строим эскиз графика рассматриваемой функции (рис. 9.16).

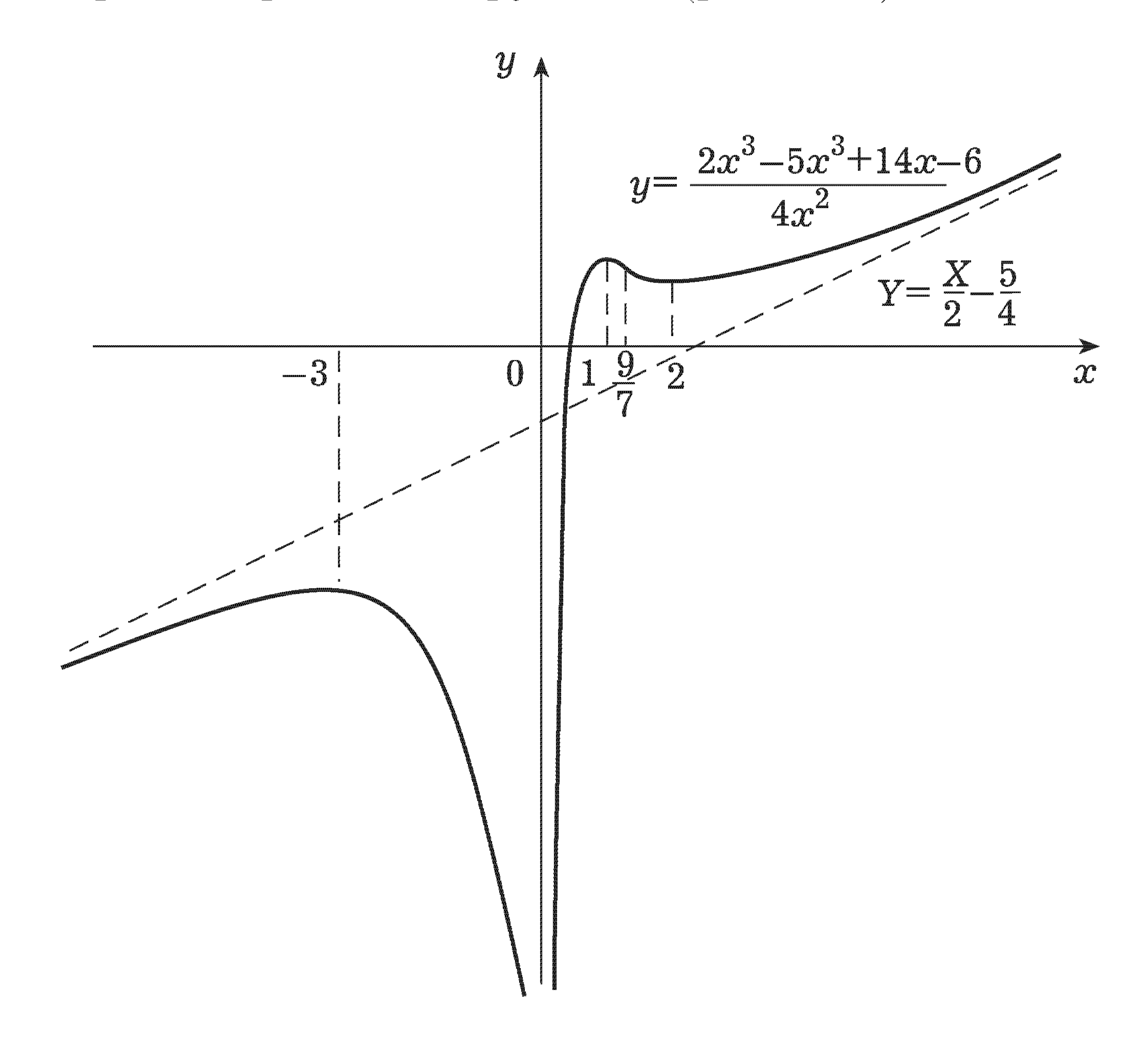


Рис. 9.16

§ 7. Отыскание максимального и минимального значений функции. Краевой экстремум

1. Отыскание максимального и минимального значений функции. Рассмотрим функцию $y = f(x)$, определенную и непрерывную на сегменте $[a, b]$. До сих пор мы интересовались лишь отысканием локальных максимумов и минимумов этой функции, а теперь поставим задачу *об отыскании максимального и минимального* значений $f(x)$ на сегменте $[a, b]$. Подчеркнем, что в силу теоремы Вейерштрасса (см. § 6 гл. 8) функция $f(x)$ обязательно достигает в некоторой точке сегмента $[a, b]$ своего максимального (минимального) значения. Ради определенности остановимся на отыскании максимального значения $f(x)$ на сегменте $[a, b]$.

Максимальное значение функции $f(x)$ может достигаться либо во внутренней точке x_0 сегмента $[a, b]$ (тогда оно совпадает с одним из локальных максимумов функции $f(x)$, см. рис. 9.17), либо на одном из концов сегмента $[a, b]$ (рис. 9.18). Отсюда ясно, что для нахождения максимального значения функции $f(x)$ на сегменте $[a, b]$ нужно сравнить между собой значения $f(x)$ во всех точках локального максимума и в граничных точках сегмента a и b. Наибольшее из этих значений и будет максимальным значением $f(x)$ на сегменте $[a, b]$. Аналогично находится и минимальное значение $f(x)$ на сегменте $[a, b]$.

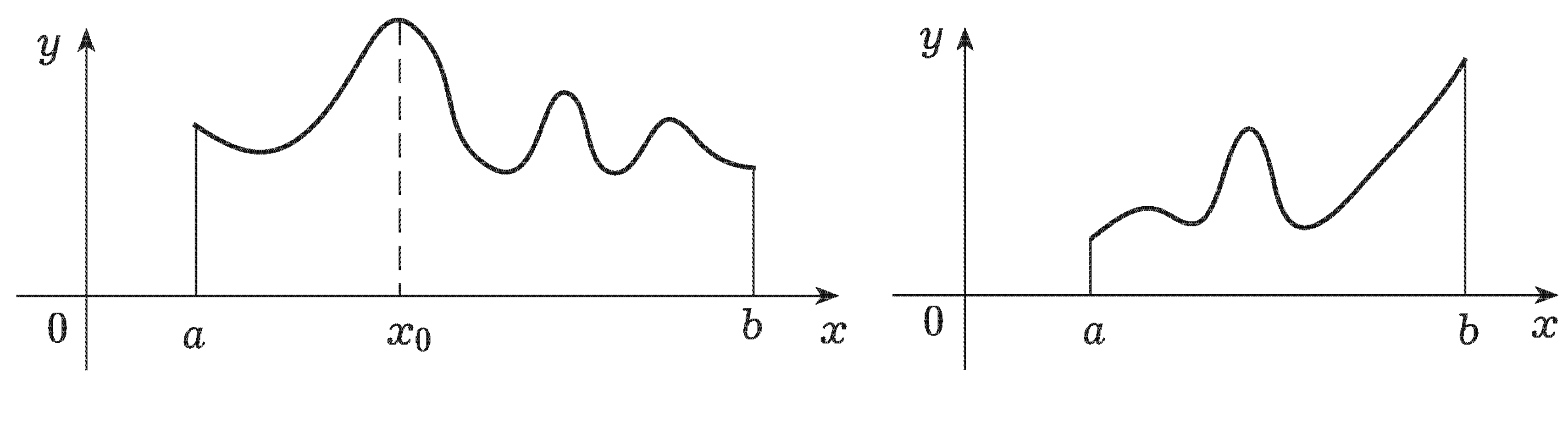


Рис. 9.17 Рис. 9.18

Если желательно избежать исследования точек возможного экстремума, то можно просто сравнить между собой значения $f(x)$ во всех точках возможного экстремума и в граничных точках a и b. Наибольшее (наименьшее) из этих значений и будет максимальным (минимальным) значением функции $f(x)$ на сегменте $[a, b]$.

Отметим далее, что если $f(x)$ имеет на сегменте $[a, b]$ *лишь одну* точку локального экстремума[1]), являющуюся точкой локального максимума (минимума), то без сравнения значения

---

[1]) Именно такой случай часто встречается на практике.

$f(x)$ в этой точке с $f(a)$ и $f(b)$ можно утверждать, что это значение является максимальным (минимальным) значением $f(x)$ на сегменте $[a, b]$ (рис. 9.19).

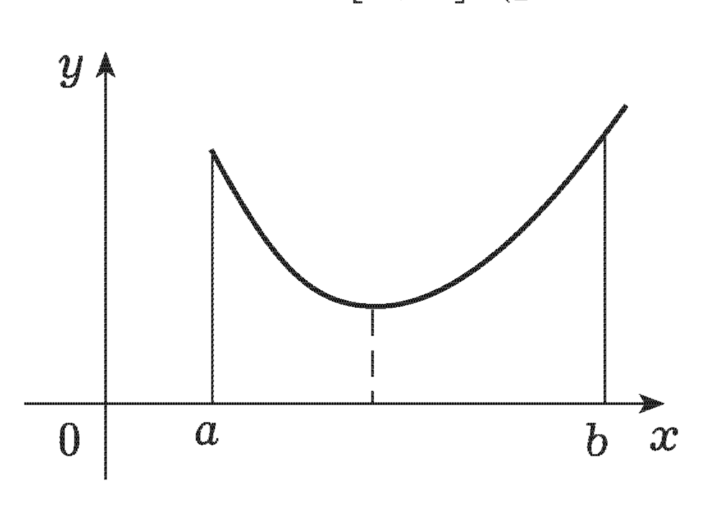


Рис. 9.19

Аналогичными средствами решается вопрос об отыскании максимального (и минимального) значения функции $y = f(x)$ на интервале, полупрямой и бесконечной прямой (при условии, что это значение существует).

Может случиться, что функция $f(x)$ вовсе не имеет на сегменте $[a, b]$ (или полупрямой $a \leqslant x < \infty$) точек возможного экстремума.

В таком случае $f(x)$ является монотонной на этом сегменте (полупрямой) и ее максимальное и минимальное значения достигаются на концах этого сегмента (на конце этой полупрямой). Этот последний случай мы проиллюстрируем физическим примером. Пусть требуется определить, какое сопротивление x нужно включить в цепь последовательно с данным сопротивлением r, чтобы на r выделилась наибольшая мощность (при этом напряжение v_0 батареи считается постоянным, см. рис. 9.20). По закону Ома ток I в цепи равен $I = v_0/(r+x)$. Стало быть, по тому же закону падение напряжения v_r на сопротивлении r равно $v_r = Ir = v_0 r/(r + x)$. Таким образом, мощность $w(x)$, выделяемая на сопротивлении r, равна

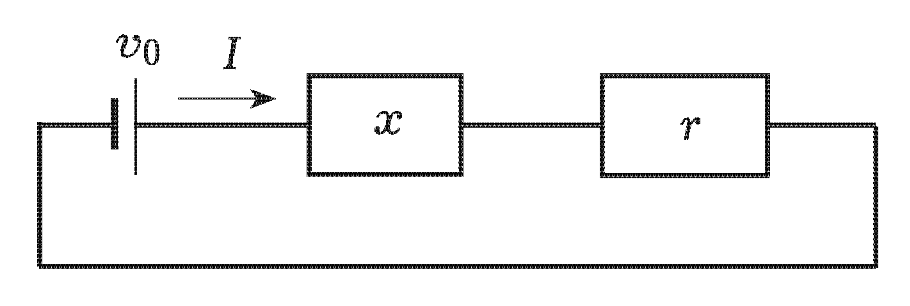


Рис. 9.20

$$w(x) = Iv_r = v_0^2 r/(r + x)^2.$$

Поскольку по физическому смыслу сопротивление x не может быть отрицательно, то задача сводится к отысканию наибольшего значения функции $w(x)$ на полупрямой $x \geqslant 0$. Вычислив производную этой функции

$$w'(x) = -\frac{2v_0^2 r}{(r + x)^3},$$

убедимся в том, что $w'(x) < 0$ всюду на полупрямой $x \geqslant 0$ и точек возможного экстремума нет. Таким образом, функция $w(x)$ убывает всюду на полупрямой $x \geqslant 0$ и ее максимальное значение на этой полупрямой достигается при $x = 0$ и равно v_0^2/r (рис. 9.21). Это совершенно ясно и из физических соображений.

В качестве второго примера рассмотрим задачу об отыскании максимального и минимального значений функции $y = \sin x^2$ на сегменте $-\sqrt{\pi} \leqslant x \leqslant \sqrt{5\pi}/2$.

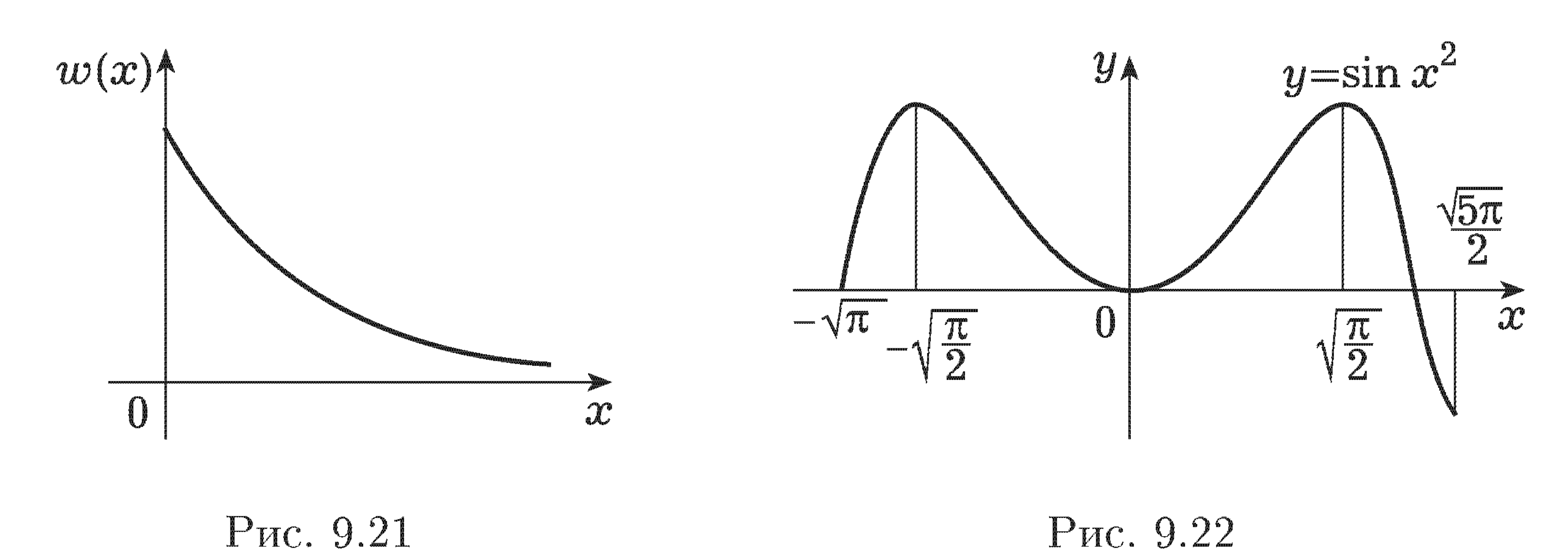


Рис. 9.21 Рис. 9.22

Поскольку $y' = 2\cos x^2$, указанная функция имеет на рассматриваемом сегменте три точки возможного экстремума $x = 0$ и $x = \pm\sqrt{\pi/2}$. Сравнивая значения функции в указанных точках и на концах сегмента

$$f(0) = 0,\ f\left(\pm\sqrt{\pi/2}\right) = 1,\ f\left(-\sqrt{\pi}\right) = 0,$$

$$f\left(\frac{\sqrt{5\pi}}{2}\right) = \sin\frac{5\pi}{4} = -\frac{\sqrt{2}}{2},$$

убедимся в том, что максимальное значение рассматриваемой функции равно $+1$ и достигается в двух внутренних точках сегмента $x_1 = -\sqrt{\pi/2}$ и $x_2 = +\sqrt{\pi/2}$, а минимальное значение рассматриваемой функции равно $-\sqrt{2}/2$ и достигается на правом конце сегмента $\sqrt{5\pi}/2$.

График рассматриваемой функции изображен на рис. 9.22.

2. Краевой экстремум. Пусть функция $y = f(x)$ определена на некотором сегменте $[a, b]$. Будем говорить, что эта функция имеет в граничной точке b этого сегмента *краевой максимум* (*краевой минимум*), если найдется левая полуокрестность точки b, в пределах которой значение $f(b)$ является наибольшим (наименьшим) среди всех других значений этой функции. Аналогично определяются краевой максимум и краевой минимум в граничной точке a сегмента $[a, b]$. Краевой максимум и краевой минимум объединяются общим названием *краевой экстремум*. Имеет место следующее ***достаточное условие краевого экстремума***: *для того чтобы функция $y = f(x)$ имела в точке b сегмента $[a, b]$ краевой максимум (краевой минимум) достаточно, чтобы эта функция имела в точке b положительную (отрицательную) левую производную*[1]. (Доказательство аналогично доказательству теоремы 8.9.) Из указанного достаточного условия краевого экстремума непосредственно вытекает

[1]) Для граничной точки a достаточным условием краевого максимума (краевого минимума) является отрицательность (положительность) правой производной в точке a.

следующее *необходимое условие краевого экстремума функции, имеющей в точке b левую производную: для того чтобы функция $y = f(x)$, обладающая в точке b левой производной, имела в этой точке краевой максимум (краевой минимум), необходимо, чтобы указанная производная была неотрицательной (неположительной).*

В заключение докажем следующее замечательное утверждение.

Теорема 9.11 (теорема Дарбу [1]***).*** *Пусть функция $f(x)$ имеет конечную производную всюду на сегменте $[a, b]$* [2]*, и пусть $f'(a+0) = A$, $f'(b-0) = B$. Тогда, каково бы ни было число C, заключенное между A и B, на этом сегменте найдется точка ξ такая, что $f'(\xi) = C$* [3]*.*

Доказательство. Сначала докажем следующее утверждение: если $F(x)$ имеет конечную производную на $[a, b]$ и если $F'(a+0)$ и $F'(b-0)$ — числа разных знаков, то на сегменте $[a, b]$ найдется точка ξ такая, что $F'(\xi) = 0$.

Пусть для определенности $F'(a+0) < 0$, $F'(b-0) > 0$. Тогда функция $F(x)$ имеет краевой максимум на обоих концах сегмента $[a, b]$. Но это означает, что минимальное значение $F(x)$ на сегменте $[a, b]$ достигается в некоторой внутренней точке ξ этого сегмента (функция $F(x)$ дифференцируема, а стало быть, и непрерывна на сегменте $[a, b]$ и поэтому достигает на этом сегменте своего минимального значения). В указанной точке ξ функция $F(x)$ имеет локальный минимум, и поэтому $F'(\xi) = 0$.

Для доказательства теоремы 9.11 остается положить $F(x) = f(x) - Cx$ и применить к $F(x)$ только что доказанное утверждение.

Замечание. Из теоремы 9.11 мы еще раз заключаем, что производная не может иметь точек разрыва первого рода (скачков).

---

[1] Гастон Дарбу — французский математик (1842–1917).

[2] Под этим понимается, что $f(x)$ имеет производную в любой внутренней точке сегмента $[a, b]$ и, кроме того, имеет левую производную в точке b и правую производную в точке a.

[3] Подчеркнем, что непрерывность производной $f'(x)$ при этом не предполагается.

Г Л А В А 10

ОПРЕДЕЛЕННЫЙ ИНТЕГРАЛ

В гл. 1 мы рассмотрели физическую задачу о вычислении пути, пройденного материальной точкой, двигающейся вдоль оси Oy, по известной скорости этой точки и геометрическую задачу о вычислении площади *криволинейной трапеции* (т. е. фигуры, лежащей между графиком функции $y = f(x)$ и сегментом $[a, b]$ оси Ox). Рассмотрение указанных двух задач естественно привело нас в гл. 1 к необходимости введения нового математического понятия — понятия *определенного интеграла.* Кроме рассмотренных двух задач к понятию определенного интеграла приводит и ряд других важных физических и геометрических задач. Настоящая глава посвящена изложению теории определенного интеграла, а в следующей главе дается применение этой теории к некоторым геометрическим и физическим задачам.

§ 1. Интегральные суммы. Интегрируемость

Пусть функция $f(x)$ задана на сегменте $[a, b]$, $a < b$. Обозначим символом T разбиение сегмента $[a, b]$ при помощи некоторых не совпадающих друг с другом точек $a = x_0 < x_1 < \ldots$ $\ldots < x_n = b$ на n частичных сегментов $[x_0, x_1]$, $[x_1, x_2]$, $\ldots$ $\ldots$, $[x_{n-1}, x_n]$. Точки $x_0, x_1, \ldots, x_n$ будем называть точками разбиения T. Пусть ξ_i — произвольная точка частичного сегмента $[x_{i-1}, x_i]$, а Δx_i — разность $x_i - x_{i-1}$, которую мы в дальнейшем будем называть длиной частичного сегмента $[x_{i-1}, x_i]$.

Определение 1. *Число $I\{x_i, \xi_i\}$, где*

$$I\{x_i, \xi_i\} = f(\xi_1)\Delta x_1 + f(\xi_2)\Delta x_2 + \ldots + f(\xi_n)\Delta x_n = \sum_{i=1}^{n} f(\xi_i)\Delta x_i,$$

называется и н т е г р а л ь н о й с у м м о й функции $f(x)$, соответствующей данному разбиению T сегмента $[a, b]$ и данному выбору промежуточных точек ξ_i на частичных сег-

ментах $[x_{i-1}, x_i]$. В дальнейшем через Δ мы будем обозначать длину максимального частичного сегмента разбиения T, т. е. $\Delta = \max \Delta x_i$.

Выясним геометрический смысл интегральной суммы. Для этого рассмотрим *криволинейную трапецию*, т. е. фигуру, ограниченную графиком функции $f(x)$ (для простоты будем считать эту функцию положительной и непрерывной), двумя ординатами, проведенными в точках a и b оси абсцисс, и осью абсцисс (рис. 10.1). Очевидно, интегральная сумма $I\{x_i, \xi_i\}$ представляет собой площадь ступенчатой фигуры, заштрихованной на рис. 10.1.

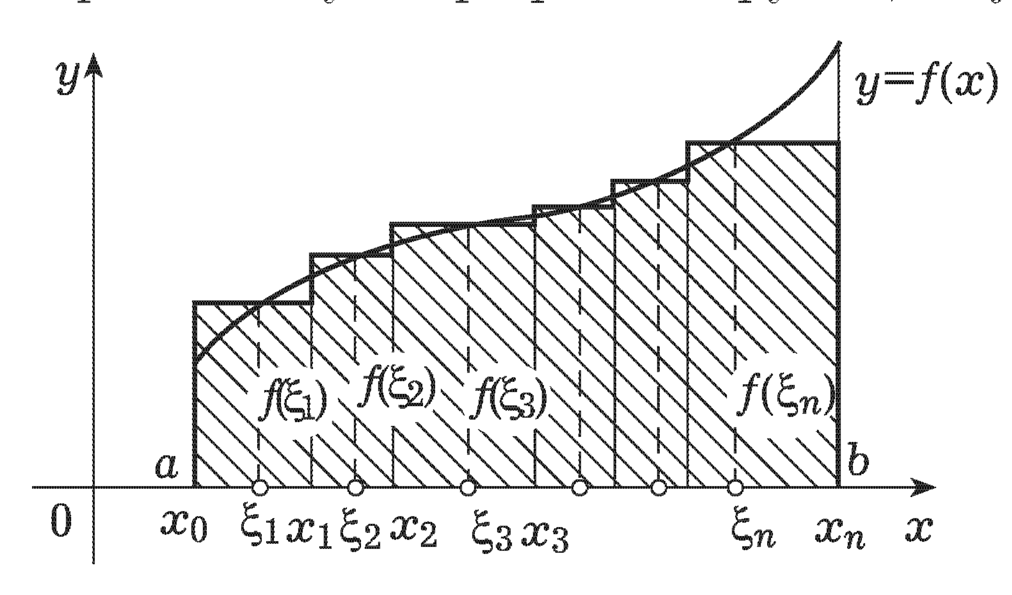


Рис. 10.1

Определение 2. *Число I называется пределом интегральных сумм $I\{x_i, \xi_i\}$ при $\Delta \to 0$, если для любого положительного числа ε можно указать такое положительное число δ* [1]*, что для любого разбиения T сегмента $[a, b]$, максимальная длина Δ частичных сегментов которого меньше δ, независимо от выбора точек ξ_i на сегментах $[x_{i-1}, x_i]$ выполняется неравенство*

$$|I\{x_i, \xi_i\} - I| < \varepsilon.$$

Для обозначения предела интегральных сумм употребляется символика

$$I = \lim_{\Delta \to 0} I\{x_i, \xi_i\}.$$

Определение 3. *Функция $f(x)$ называется интегрируемой (по Риману* [2]*) на сегменте $[a, b]$, если существует конечный предел I интегральных сумм этой функции при $\Delta \to 0$. Указанный предел I называется определенным интегралом от функции $f(x)$ по сегменту $[a, b]$ и обозначается следующим образом:*

$$I = \int_a^b f(x)\, dx.$$

Наглядные геометрические представления показывают [3], что определенный интеграл численно равен площади криволиней-

[1] Так как число δ зависит от ε, то иногда пишут $\delta = \delta(\varepsilon)$.

[2] Бернгард Риман — немецкий математик (1826–1866).

[3] См. § 4 гл. 1.

ной трапеции, определяемой графиком функции $f(x)$ на сегменте $[a, b]$. В гл. 11 мы докажем справедливость этого утверждения.

Приведем пример *интегрируемой функции*. Докажем, что функция $f(x) = c = \text{const}$ интегрируема на любом сегменте $[a, b]$, причем $\int\limits_a^b c\,dx = c(b-a)$. В самом деле, так как $f(\xi_i) = c$ при любых ξ_i, то

$$I\{x_i, \xi_i\} = c\Delta x_1 + c\Delta x_2 + \ldots + c\Delta x_n = \\ = c(\Delta x_1 + \Delta x_2 + \ldots + \Delta x_n) = c(b-a),$$

и поэтому $\lim\limits_{\Delta \to 0} I\{x_i, \xi_i\} = c(b-a)$.

Выясним вопрос об интегрируемости неограниченных на сегменте $[a, b]$ функций.

Докажем следующее утверждение: *неограниченная на сегменте $[a, b]$ функция $f(x)$ не интегрируема на этом сегменте.*

Доказательство. Пусть функция $f(x)$ не ограничена на сегменте $[a, b]$. Тогда она не ограничена на некотором частичном сегменте $[x_{k-1}, x_k]$ *любого* данного разбиения T сегмента $[a, b]$. Поэтому слагаемое $f(\xi_k)\Delta x_k$ интегральной суммы $I\{x_i, \xi_i\}$, отвечающей этому разбиению T, может быть сделано как угодно большим по абсолютной величине за счет выбора точки ξ_k. Отсюда вытекает, что интегральные суммы $I\{x_i, \xi_i\}$, отвечающие любому разбиению T, не ограничены [1]) и поэтому не существует конечного предела интегральных сумм.

Сообразуясь с доказанным утверждением, будем рассматривать лишь ограниченные на сегменте $[a, b]$ функции. Возникает вопрос: *всякая ли ограниченная на сегменте $[a, b]$ функция является интегрируемой на этом сегменте*? Следующий пример показывает, что это, вообще говоря, не так. Убедимся, что заведомо ограниченная на сегменте $[a, b]$ *функция Дирихле*, значения которой в рациональных точках равны единице, а в иррациональных — нулю, *не интегрируема* на сегменте $[a, b]$. Действительно, если для *любого* разбиения T *со сколь угодно малым* Δ выбрать точки ξ_i рациональными, то, очевидно, $I\{x_i, \xi_i\} = \sum\limits_{i=1}^{n} f(\xi_i)\Delta x_i = \sum\limits_{i=1}^{n} \Delta x_i = b - a$, если же для того же разбиения T точки ξ_i выбрать иррациональными, то $I\{x_i, \xi_i\} = 0$. Поэто-

---

[1]) Чтобы убедиться в этом, достаточно фиксировать точки ξ_i на всех частичных сегментах разбиения T, за исключением сегмента $[x_{k-1}, x_k]$. Тогда в интегральной сумме $I\{x_i, \xi_i\}$ будет изменяться лишь слагаемое $f(\xi_k)\Delta x_k$, которое может быть как угодно большим по абсолютной величине.

му для функции Дирихле не существует предела интегральных сумм, т. е. эта функция не интегрируема.

В дальнейшем мы докажем интегрируемость всех непрерывных функций и широкого класса разрывных функций.

§ 2. Верхние и нижние суммы

1. Понятие верхней и нижней сумм. Пусть функция $f(x)$ ограничена на сегменте $[a, b]$ и T — разбиение этого сегмента точками $a = x_0 < x_1 < \ldots < x_n = b$. Обозначим через M_i и m_i соответственно точную верхнюю и точную нижнюю грани этой функции на сегменте $[x_{i-1}, x_i]$. *Суммы*

$$S = M_1 \Delta x_1 + M_2 \Delta x_2 + \ldots + M_n \Delta x_n = \sum_{i=1}^{n} M_i \Delta x_i$$

и

$$s = m_1 \Delta x_1 + m_2 \Delta x_2 + \ldots + m_n \Delta x_n = \sum_{i=1}^{n} m_i \Delta x_i$$

называются соответственно ***верхней и нижней суммами*** *функции $f(x)$ для данного разбиения T сегмента $[a, b]$.*

Очевидно, что *любая интегральная сумма $I\{x_i, \xi_i\}$ данного разбиения T сегмента $[a, b]$ заключена между верхней и нижней суммами S и s этого разбиения.*

Понятия *верхней* и *нижней* сумм становятся особенно ясными, если обратиться к геометрическим представлениям. Для простоты рассмотрим положительную и непрерывную функцию $f(x)$ и криволинейную трапецию, определяемую этой функцией (рис. 10.2 и 10.3). Если T — некоторое разбиение сегмента $[a, b]$, то числа M_i и m_i представляют собой в случае непрерывной функции $f(x)$ максимальное и минимальное значения этой функции на частичном сегменте $[x_{i-1}, x_i]$ разбиения T. Поэтому верхняя сумма S равна площади, заштрихованной на рис. 10.2 ступенчатой фигуры, которая *содержит* криволинейную трапецию, а нижняя сумма s равна площади, заштрихованной на рис. 10.3 ступенчатой фигуры, которая *содержится* в криволинейной трапеции (эта трапеция на рисунках 10.2 и 10.3 обведена жирной линией).

Как уже говорилось, из наглядных геометрических представлений вытекает, что интеграл численно равен площади криволинейной трапеции. С другой стороны, очевидно, что если разность между верхними и нижними суммами может быть сделана как угодно малой, то эти суммы могут стать как угодно близкими к площади криволинейной трапеции. Поэтому можно ожидать, что для интегрируемости функции необходимо и доста-

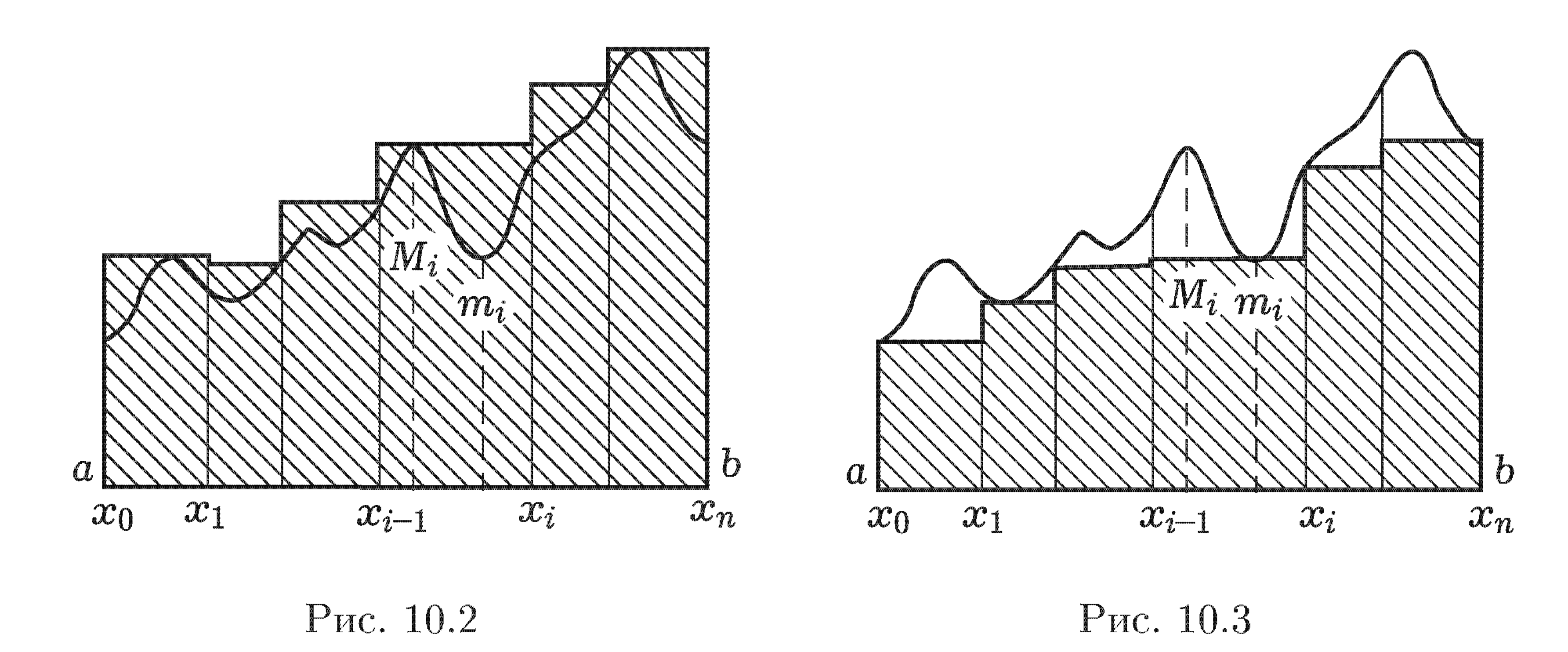


Рис. 10.2 Рис. 10.3

точно, чтобы разность между верхней и нижней суммами могла быть как угодно малой. Строгое доказательство этого будет дано в следующем параграфе.

2. Свойства верхних и нижних сумм. Докажем справедливость следующих свойств верхних и нижних сумм:

1°. *Для любого фиксированного разбиения T и для любого $\varepsilon > 0$ промежуточные точки ξ_i на сегментах $[x_{i-1}, x_i]$ можно выбрать так, что интегральная сумма $I\{x_i, \xi_i\}$ будет удовлетворять неравенствам $0 \leqslant S - I\{x_i, \xi_i\} < \varepsilon$. Точки ξ_i можно выбрать также и таким образом, что интегральная сумма будет удовлетворять неравенствам $0 \leqslant I\{x_i, \xi_i\} - s < \varepsilon$.*

Пусть T — некоторое фиксированное разбиение сегмента $[a, b]$. Докажем, например, возможность выбора по данному $\varepsilon > 0$ точек ξ_i так, что будет выполняться неравенство $0 \leqslant S - I\{x_i, \xi_i\} < \varepsilon$. По определению точной грани M_i для данного $\varepsilon > 0$ на сегменте $[x_{i-1}, x_i]$ можно указать такую точку ξ_i, что

$$0 \leqslant M_i - f(\xi_i) < \varepsilon/(b-a), \quad i = 1, 2, \ldots, n.$$

Умножая эти неравенства на Δx_i и затем складывая, получим

$$0 \leqslant S - I\{x_i, \xi_i\} < \varepsilon.$$

Справедливость свойства 1° установлена.

2°. *Если разбиение T' сегмента $[a, b]$ получено путем добавления новых точек к точкам разбиения T этого сегмента, то верхняя сумма S' разбиения T' не больше верхней суммы S разбиения T, а нижняя сумма s' разбиения T' не меньше нижней суммы s разбиения T, т. е.*

$$s \leqslant s', \quad S' \leqslant S.$$

Так как разбиение T' может быть получено из разбиения T путем последовательного добавления к последнему новых точек, то, очевидно, сформулированное свойство достаточно доказать для случая, когда к разбиению T добавляется одна точка. Пусть эта точка x' располагается на сегменте $[x_{i-1}, x_i]$ разбиения T сег-

мента $[a, b]$. Обозначим через M_i' и M_i'' точные верхние грани функции $f(x)$ на сегментах $[x_{i-1}, x']$ и $[x', x_i]$, через $\Delta x_i'$ и $\Delta x_i''$ длины этих сегментов и через S и S' верхние суммы разбиения T и разбиения T', полученного добавлением к разбиению T точки x'. Отметим, что $\Delta x_i = \Delta x_i' + \Delta x_i''$. Кроме того, если M_i — точная верхняя грань значений функции $f(x)$ на сегменте $[x_{i-1}, x_i]$, то $M_i \geqslant M_i'$ и $M_i \geqslant M_i''$, поскольку очевидно, что *точная верхняя грань функции на части сегмента* $[x_{i-1}, x_i]$ *не превосходит точную верхнюю грань* M_i *этой функции на всем сегменте* $[x_{i-1}, x_i]$. Поэтому, учитывая, что суммы S и S' различаются лишь слагаемыми $M_i \Delta x_i$ и $M_i' \Delta x_i' + M_i'' \Delta x_i''$, получим

$$S - S' = M_i \Delta x_i - (M_i' \Delta x_i' + M_i'' \Delta x_i'') = \\ = (M_i - M_i') \Delta x_i' + (M_i - M_i'') \Delta x_i'' \geqslant 0,$$

т. е. $S' \leqslant S$. Доказательство для нижних сумм проводится аналогично.

3°. *Пусть T' и T'' — любые два разбиения сегмента $[a, b]$. Тогда нижняя сумма одного из этих разбиений не превосходит верхнюю сумму другого. Именно, если s', S' и s'', S'' — соответственно нижние и верхние суммы разбиений T' и T'', то*

$$s' \leqslant S'', \quad s'' \leqslant S'.$$

Выше мы установили, что нижняя сумма данного разбиения не превосходит верхнюю сумму этого разбиения. Пусть T — разбиение сегмента $[a, b]$, полученное объединением разбиений [1] T' и T'', а s и S — верхняя и нижняя суммы разбиения T. Так как разбиение T может быть получено из разбиения T' добавлением к нему точек разбиения T'', то по свойству 2° и отмеченному свойству нижней и верхней суммы одного и того же разбиения имеем

$$s' \leqslant s \leqslant S \leqslant S'.$$

Но разбиение T может быть также получено из разбиения T'' добавлением к нему точек разбиения T'. Поэтому

$$s'' \leqslant s \leqslant S \leqslant S''.$$

Сравнивая установленные выше неравенства с только что полученными, убедимся, что $s' \leqslant S''$, $s'' \leqslant S'$.

Справедливость свойства 3° установлена.

4°. *Множество $\{S\}$ верхних сумм данной функции $f(x)$ для всевозможных разбиений сегмента $[a, b]$ ограничено снизу. Множество $\{s\}$ нижних сумм ограничено сверху.*

---

[1] При этом общие точки разбиений T' и T'' учитываются один раз.

Это свойство непосредственно следует из свойства 3°. Действительно, любая верхняя сумма не меньше некоторой фиксированной нижней суммы, следовательно, множество $\{S\}$ верхних сумм ограничено снизу. Любая нижняя сумма не превосходит какую-либо верхнюю сумму, и поэтому множество $\{s\}$ нижних сумм ограничено сверху. Обозначим через $\overline{I}$ точную нижнюю грань множества $\{S\}$ верхних сумм, а через $\underline{I}$ — точную верхнюю грань множества нижних сумм:

$$\overline{I} = \inf\{S\}, \qquad \underline{I} = \sup\{s\}.$$

Числа $\overline{I}$ и $\underline{I}$ называются соответственно *верхним и нижним интегралами Дарбу от функции* $f(x)$. Докажем, что $\underline{I} \leqslant \overline{I}$. Пусть $\underline{I} > \overline{I}$. Тогда разность $\underline{I} - \overline{I}$ есть положительное число, которое мы обозначим через ε, так что $\underline{I} - \overline{I} = \varepsilon > 0$. Из определения точных граней $\underline{I}$ и $\overline{I}$ вытекает, что существуют числа S' и s'', представляющие собой соответственно верхнюю и нижнюю суммы некоторых разбиений T' и T'' сегмента $[a, b]$, такие, что $\overline{I} + \frac{\varepsilon}{2} > S'$ и $\underline{I} - \frac{\varepsilon}{2} < s''$. Вычитая второе неравенство из первого и учитывая, что $\overline{I} - \underline{I} = \varepsilon$, получим $s'' > S'$. Но это последнее неравенство противоречит свойству 3° верхних и нижних сумм.

5°. *Пусть разбиение T' сегмента $[a, b]$ получено из разбиения T добавлением к последнему p новых точек, и пусть s', S' и s, S — соответственно нижние и верхние суммы разбиений T' и T. Тогда для разностей $S - S'$ и $s' - s$* [1]) *может быть получена оценка, зависящая от максимальной длины Δ частичных сегментов разбиения T, числа p добавленных точек и точных верхней и нижней граней M и m функции $f(x)$ на сегменте $[a, b]$. Именно,*

$$S - S' \leqslant (M - m)p\Delta, \qquad s' - s \leqslant (M - m)p\Delta.$$

Для того чтобы убедиться в справедливости этого свойства, достаточно доказать приведенные неравенства для случая, когда к разбиению T добавляется одна точка x'. Пусть эта точка находится на сегменте $[x_{i-1}, x_i]$ разбиения T. Тогда этот сегмент разделится на два сегмента $[x_{i-1}, x']$ и $[x', x_i]$, длины которых мы обозначим соответственно через $\Delta x_i'$ и $\Delta x_i''$. Пусть M_i, M_i' и M_i'' — соответственно точные верхние грани функции $f(x)$ на сегментах $[x_{i-1}, x_i]$, $[x_{i-1}, x']$ и $[x', x_i]$. Так как $\Delta x_i = \Delta x_i' + \Delta x_i''$ и верхние суммы S и S' разбиений T и T' различаются лишь слагаемыми $M_i \Delta x_i$ и $M_i' \Delta x_i' + M_i'' \Delta x_i''$, то $S - S' = M_i(\Delta x_i' + \Delta x_i'') - (M_i' \Delta x_i' + M_i'' \Delta x_i'') = (M_i - M_i')\Delta x_i' + (M_i - M_i'')\Delta x_i''$.

---

[1]) Отметим, что в силу свойства 2° эти разности неотрицательны.

Далее, $m \leqslant M_i' \leqslant M_i \leqslant M$ и $m \leqslant M_i'' \leqslant M_i \leqslant M$ [1]), поэтому $M_i - M_i' \leqslant M - m$ и $M_i - M_i'' \leqslant M - m$. Следовательно, $S - S' \leqslant (M-m)(\Delta x_i' + \Delta x_i'') = (M-m)\Delta x_i$. Поскольку $\Delta x_i \leqslant \Delta$, то $S - S' \leqslant (M - m)\Delta$. Это неравенство совпадает с первым из неравенств, приведенных в формулировке свойства 5°, при $p = 1$. Доказательство для нижних сумм проводится аналогично.

6°. ***Лемма Дарбу.*** *Верхний $\overline{I}$ и нижний $\underline{I}$ интегралы Дарбу от функции $f(x)$ по сегменту $[a, b]$ являются соответственно пределами*[2]) *верхних и нижних сумм при $\Delta \to 0$.*

Доказательство. Докажем, например, что $\lim\limits_{\Delta\to 0} S = \overline{I}$. Для случая $M = m$, т. е. для случая $f(x) = c = \text{const}$, лемма очевидна, поскольку $S = \overline{I} = \underline{I} = s$. Будем поэтому считать, что $M > m$. Так как $\overline{I}$ — точная нижняя грань множества верхних сумм, то для любого данного $\varepsilon > 0$ можно указать такое разбиение T^* сегмента $[a, b]$, что верхняя сумма S^* этого разбиения будет отличаться от $\overline{I}$ меньше, чем на $\varepsilon/2$:

$$S^* - \overline{I} < \varepsilon/2. \tag{10.1}$$

Обозначим через p число точек разбиения T^*, лежащих строго внутри сегмента $[a, b]$. Пусть T — любое разбиение сегмента $[a, b]$, максимальная длина Δ частичных сегментов которого подчинена условию

$$\Delta < \delta = \frac{\varepsilon}{2(M-m)p} \tag{10.2}$$

и S — верхняя сумма этого разбиения. Добавим к этому разбиению внутренние точки разбиения T^*. В результате мы получим разбиение T', верхняя сумма S' которого в силу свойства 5° и условия (10.2) для Δ удовлетворяет неравенству

$$0 \leqslant S - S' \leqslant (M - m)p\Delta < \varepsilon/2. \tag{10.3}$$

С другой стороны, это разбиение T' можно рассматривать как разбиение, полученное в результате добавления к разбиению T^*

---

[1]) Выше, при доказательстве свойства 2°, мы уже отмечали, что точная верхняя грань функции на части сегмента не превосходит ее точной верхней грани на всем сегменте. Отметим также, что точная нижняя грань функции на всем сегменте не превосходит ее точной верхней грани на любой части этого сегмента.

[2]) Понятие предела верхних или нижних сумм определяется в полной аналогии с понятием предела интегральных сумм. Именно, число $\overline{I}$ называется пределом верхних сумм S при $\Delta \to 0$, если для любого положительного числа ε можно указать такое положительное число δ, что при $\Delta < \delta$ выполняется неравенство $|S - \overline{I}| < \varepsilon$.

внутренних точек разбиения T. Поэтому, в силу свойства 2°,

$$\overline{I} \leqslant S' \leqslant S^*.$$

Отсюда следует, что $0 \leqslant S' - \overline{I} \leqslant S^* - \overline{I}$, т. е., согласно неравенству (10.1),

$$0 \leqslant S' - \overline{I} < \varepsilon/2.$$

Складывая это неравенство с неравенством (10.3), получим

$$0 \leqslant S - \overline{I} < \varepsilon. \tag{10.4}$$

Таким образом, мы установили, что для любого данного $\varepsilon > 0$ можно указать такое $\delta > 0$ (можно, например, положить $\delta = \dfrac{\varepsilon}{2(M-m)p}$), что верхние суммы S разбиений T сегмента $[a, b]$, для которых максимальная длина Δ частичных сегментов меньше δ (см. (10.2)), удовлетворяют неравенству (10.4). Но это означает, что верхний интеграл $\overline{I}$ Дарбу является пределом верхних сумм. Для нижних сумм доказательство аналогично. Лемма Дарбу доказана.

§ 3. Необходимое и достаточное условие интегрируемости

Установленные свойства верхних и нижних сумм позволяют сформулировать в весьма простой форме необходимое и достаточное условие интегрируемости функции. Именно, имеет место следующая *основная* теорема.

Теорема 10.1. *Для того чтобы ограниченная на сегменте $[a, b]$ функция $f(x)$ была интегрируемой на этом сегменте, необходимо и достаточно, чтобы для любого $\varepsilon > 0$ нашлось такое разбиение T сегмента $[a, b]$, для которого*

$$S - s \leqslant \varepsilon.$$

Доказательство. 1) Необходимость. Пусть функция $f(x)$ интегрируема на сегменте $[a, b]$. Обозначим через I предел интегральных сумм этой функции. По определению предела интегральных сумм для любого $\varepsilon > 0$ можно указать такое $\delta > 0$, что для любого разбиения T, удовлетворяющего условию $\Delta < \delta$, независимо от выбора точек ξ_i на частичных сегментах разбиения выполняется неравенство

$$|I\{x_i, \xi_i\} - I| < \varepsilon/4. \tag{10.5}$$

Зафиксируем одно такое разбиение T. По свойству 1° (см. п. 2 предыдущего параграфа) для данного разбиения T можно указать такие две интегральные суммы (иными словами, можно так

выбрать точки ξ_i' и ξ_i'' на каждом частичном сегменте $[x_{i-1}, x_i]$), что

$$S - I\{x_i, \xi_i'\} \leqslant \frac{\varepsilon}{4}, \qquad I\{x_i, \xi_i''\} - s \leqslant \frac{\varepsilon}{4}.$$

Отметим, что обе интегральные суммы $I\{x_i, \xi_i'\}$ и $I\{x_i, \xi_i''\}$ удовлетворяют неравенству (10.5). Из соотношения

$$S - s = (S - I\{x_i, \xi_i'\}) + (I\{x_i, \xi_i'\} - I) + \\ + (I - I\{x_i, \xi_i''\}) + (I\{x_i, \xi_i''\} - s),$$

неравенства (10.5) и неравенств $S - I\{x_i, \xi_i'\} \leqslant \frac{\varepsilon}{4}$, $I\{x_i, \xi_i''\} - s \leqslant \frac{\varepsilon}{4}$ вытекает, что

$$S - s < \varepsilon.$$

Необходимость условий теоремы доказана.

2) Достаточность. Так как для любого разбиения T справедливы неравенства $s \leqslant \underline{I} \leqslant \overline{I} \leqslant S$ и для любого $\varepsilon > 0$, согласно условию теоремы, можно указать такое разбиение, что $S - s \leqslant \varepsilon$, то $0 \leqslant \overline{I} - \underline{I} \leqslant \varepsilon$. В силу произвольности ε получим, что $\underline{I} = \overline{I}$.

Общее значение чисел $\underline{I}$ и $\overline{I}$ обозначим через I и докажем, что это число I является пределом интегральных сумм функции $f(x)$. Действительно, в силу леммы Дарбу (см. п. 2 § 2) это число I есть общий предел при $\Delta \to 0$ верхних и нижних сумм. Поэтому для любого ε можно указать такое δ, что при $\Delta < \delta$ выполняются неравенства $I - s < \varepsilon/2$ и $S - I < \varepsilon/2$, т. е. при $\Delta < \delta$, $S - s < \varepsilon$, причем $s \leqslant I \leqslant S$. Любая интегральная сумма $I\{x_i, \xi_i\}$ данного разбиения T заключена между верхней и нижней суммами $s \leqslant I\{x_i, \xi_i\} \leqslant S$. Таким образом, при $\Delta < \delta$ величины I и $I\{x_i, \xi_i\}$ заключены между числами S и s, разность между которыми меньше ε. Отсюда вытекает, что при $\Delta < \delta$

$$|I\{x_i, \xi_i\} - I| < \varepsilon.$$

Следовательно, число I есть предел интегральных сумм. Теорема доказана.

В дальнейшем нам понадобится несколько иная форма записи необходимого и достаточного условия интегрируемости. Пусть M_i и m_i — точные грани значений функции $f(x)$ на $[x_{i-1}, x_i]$. Число

$$\omega_i = M_i - m_i$$

называется *колебанием функции* $f(x)$ на сегменте $[x_{i-1}, x_i]$. Отметим, что так как $M_i \geqslant m_i$, то колебание ω_i является неотрицательным числом. Запишем теперь разность $S - s$ в следующей форме:

$$S - s = \sum_{i=1}^{n} M_i \Delta x_i - \sum_{i=1}^{n} m_i \Delta x_i = \sum_{i=1}^{n} (M_i - m_i) \Delta x_i = \sum_{i=1}^{n} \omega_i \Delta x_i.$$

Поскольку $\omega_i \geqslant 0$ и $\Delta x_i > 0$, то каждое слагаемое в последней сумме неотрицательно.

Можно сформулировать необходимое и достаточное условие интегрируемости функции в следующей форме.

Для того чтобы функция $f(x)$ была интегрируемой на сегменте $[a, b]$, необходимо и достаточно, чтобы для любого $\varepsilon > 0$ нашлось такое разбиение T сегмента $[a, b]$, для которого

$$\sum_{i=1}^{n} \omega_i \Delta x_i \leqslant \varepsilon.$$

§ 4. Некоторые классы интегрируемых функций

В этом параграфе мы докажем интегрируемость непрерывных на сегменте функций, некоторых разрывных функций и монотонных функций. Для доказательства интегрируемости непрерывных функций нам понадобится важное свойство непрерывных на сегменте функций, которое устанавливается в ближайшем пункте.

1. Свойство равномерной непрерывности функции.

Определение. *Функция $f(x)$ называется равномерно непрерывной на множестве $\{x\}$*[1]*, если для любого положительного числа ε можно указать такое положительное δ, зависящее только от ε, что для любых двух точек x' и x'' множества $\{x\}$, удовлетворяющих условию $|x'' - x'| < \delta$, выполняется неравенство $|f(x'') - f(x')| < \varepsilon$.*

Замечание. Главное в этом определении то, что для любого $\varepsilon > 0$ найдется $\delta > 0$, *гарантирующее выполнение неравенства $|f(x'') - f(x')| < \varepsilon$ сразу для всех x' и x'' из множества $\{x\}$ при единственном условии $|x'' - x'| < \delta$.*

Для разъяснения свойства равномерной непрерывности рассмотрим следующие примеры:

1) Функция $f(x) = \sqrt{x}$ *равномерно непрерывна* на полупрямой $x \geqslant 1$. В самом деле, по теореме Лагранжа имеем для любых $x' \geqslant 1$ и $x'' \geqslant 1$

$$|f(x'') - f(x')| = |f'(\xi)|\,|x'' - x'| = \frac{1}{2\sqrt{\xi}}|x'' - x'| < \frac{1}{2}|x'' - x'|$$

(последнее неравенство вытекает из того, что ξ заключено между x' и x'', и поэтому $\xi > 1$). Следовательно, если по данному $\varepsilon > 0$ выбрать любое δ, удовлетворяющее условию $0 < \delta \leqslant 2\varepsilon$, то при $|x'' - x'| < \delta$ выполняется неравенство $|f(x'') - f(x')| <$

[1]) При этом предполагается, что множество $\{x\}$ плотно в себе (см. конец § 3 гл. 2).

$< \varepsilon$, т. е. на множестве $x \geqslant 1$ функция $f(x) = \sqrt{x}$ равномерно непрерывна.

2) Функция $f(x) = x^2$ *не является равномерно непрерывной* на множестве $x \geqslant 1$. Достаточно доказать, что для некоторого $\varepsilon > 0$ нельзя выбрать $\delta > 0$, гарантирующего выполнение неравенства $|f(x'') - f(x')| < \varepsilon$ для всех $x' \geqslant 1$ и $x'' \geqslant 1$ при единственном условии $|x'' - x'| < \delta$. Мы докажем, что на самом деле даже для любого $\varepsilon > 0$ нельзя выбрать указанного выше δ. Фиксируем $\varepsilon > 0$ и рассмотрим любое положительное δ. Выберем $x' > \frac{\varepsilon}{\delta}$, $x'' = x' + \frac{\delta}{2}$. Тогда $|x'' - x'| = \frac{\delta}{2} < \delta$. Используя теорему Лагранжа, получим

$$|f(x'') - f(x')| = 2\xi|x'' - x'| = \xi\delta.$$

Так как ξ заключено между x' и x'', то $\xi > \frac{\varepsilon}{\delta}$, и поэтому из последнего равенства вытекает неравенство

$$|f(x'') - f(x')| > \varepsilon,$$

хотя $|x''-x'| < \delta$. Таким образом, функция $f(x) = x^2$ не является равномерно непрерывной на множестве $x \geqslant 1$.

3) Функция $f(x) = \sin\frac{1}{x}$ *не является равномерно непрерывной* на интервале $(0, 1)$. Докажем, что для любого ε, удовлетворяющего условиям $0 < \varepsilon < 2$, нельзя указать $\delta > 0$, гарантирующего выполнение неравенства $|f(x'') - f(x')| < \varepsilon < 2$ для всех x' и x'' из интервала $(0, 1)$ при единственном условии $|x'' - x'| < \delta$. Чтобы убедиться в этом, достаточно положить $x' = \frac{2}{(4k+3)\pi}$ и $x'' = \frac{2}{(4k+1)\pi}$ и для любого $\delta > 0$ выбрать k столь большим, что $|x'' - x'| < \delta$. Для указанных точек x' и x'' при любом k разность

$$|f(x'') - f(x')| = \left|\sin\frac{1}{x''} - \sin\frac{1}{x'}\right| = 2 > \varepsilon.$$

Докажем следующую *основную* теорему.

***Теорема 10.2* (*теорема о равномерной непрерывности*).** *Непрерывная на сегменте $[a, b]$ функция $f(x)$ равномерно непрерывна на этом сегменте.*

Доказательство. Предположим, что непрерывная на сегменте $[a, b]$ функция $f(x)$ не является равномерно непрерывной на этом сегменте. Тогда для *некоторого* $\varepsilon > 0$ не выполняются условия, сформулированные в определении равномерной непрерывности. Это означает, что для указанного $\varepsilon > 0$ и *любого* положительного числа δ на сегменте $[a, b]$ найдутся точки

x' и x'' такие, что $|x'' - x'| < \delta$, но $|f(x'') - f(x')| \geqslant \varepsilon$. Поэтому для каждого $\delta = 1/n$, $n = 1, 2, \ldots$, найдутся точки x'_n и x''_n сегмента $[a, b]$ такие, что $|x''_n - x'_n| < 1/n$, но $|f(x''_n) - f(x'_n)| \geqslant \varepsilon$. Так как $\{x'_n\}$ — последовательность точек сегмента $[a, b]$, то из нее, согласно теореме Больцано–Вейерштрасса, можно выделить сходящуюся к некоторой точке c этого сегмента подпоследовательность $\{x'_{k_n}\}$ (см. замечание 2 п. 4 § 4 гл. 3). Очевидно, подпоследовательность $\{x''_{k_n}\}$ последовательности $\{x''_n\}$ также сходится к c. Так как функция $f(x)$ непрерывна в точке c, то пределы последовательностей $\{f(x'_{k_n})\}$ и $\{f(x''_{k_n})\}$ равны $f(c)$, и поэтому последовательность $\{f(x''_{k_n}) - f(x'_{k_n})\}$ является бесконечно малой. Но этого не может быть, поскольку все элементы $f(x''_{k_n}) - f(x'_{k_n})$ указанной последовательности удовлетворяют неравенству $|f(x''_{k_n}) - f(x'_{k_n})| \geqslant \varepsilon$. Таким образом, предположение о том, что непрерывная на сегменте $[a, b]$ функция не является равномерно непрерывной, ведет к противоречию. Теорема доказана.

Следствие. *Пусть функция $f(x)$ непрерывна на сегменте $[a, b]$. Тогда для любого положительного числа ε можно указать такое $\delta > 0$, что на каждом принадлежащем сегменту $[a, b]$ частичном сегменте $[c, d]$, длина $d - c$ которого меньше δ, колебание ω* [1] *функции $f(x)$ меньше ε.*

Доказательство. В силу только что доказанной теоремы непрерывная на сегменте $[a, b]$ функция $f(x)$ равномерно непрерывна на этом сегменте. Поэтому для любого $\varepsilon > 0$ можно указать $\delta > 0$ такое, что для любых x' и x'' из сегмента $[a, b]$, удовлетворяющих условию $|x'' - x'| < \delta$, выполняется неравенство $|f(x'') - f(x')| < \varepsilon$. Докажем, что на каждом принадлежащем сегменту $[a, b]$ частичном сегменте $[c, d]$, длина $d - c$ которого меньше указанного δ, колебание ω функции $f(x)$ меньше ε. В самом деле, поскольку функция $f(x)$ непрерывна на сегменте $[c, d]$, то на этом сегменте можно указать такие точки x' и x'', что $f(x') = m$, а $f(x'') = M$, где m и M — точные нижняя и верхняя грани $f(x)$ на сегменте $[c, d]$ (см. теорему 8.8). Так как $|x'' - x'| < \delta$ (ибо длина сегмента $[c, d]$ меньше δ), то $|f(x'') - f(x')| < \varepsilon$. Но $f(x'') - f(x') = M - m = \omega$. Поэтому $\omega < \varepsilon$.

Замечание. Множество $\{x\}$ точек числовой прямой называется *замкнутым*, если оно содержит все свои предельные точки [2]. Справедли-

---

[1] Напомним, что *колебанием* ω функции $f(x)$ на сегменте $[c, d]$ называется разность $M - m$ между точной верхней и точной нижней гранями функции $f(x)$ на этом сегменте.

[2] Определение предельной точки множества дано в п. 6 § 4 гл. 3.

во следующее утверждение. *Непрерывная на замкнутом ограниченном* [1]) *множестве* $\{x\}$ *функция* $f(x)$ *равномерно непрерывна на этом множестве.* Доказательство этого утверждения аналогично доказательству теоремы 10.2.

2. Лемма Гейне–Бореля. Другое доказательство теоремы о равномерной непрерывности. Точка x множества $\{x\}$ называется *внутренней точкой* этого множества, если она принадлежит некоторому интервалу, все точки которого принадлежат множеству $\{x\}$. Множество $\{x\}$ называется *открытым*, если все точки этого множества внутренние.

Мы будем говорить, что *данное множество* $\{x\}$ *покрыто системой* Σ *открытых множеств* [2]), если каждая точка x этого множества принадлежит по крайней мере одному множеству системы Σ. Докажем следующую лемму.

Лемма Гейне–Бореля [3]). *Если сегмент* $[a, b]$ *покрыт бесконечной системой* Σ *открытых множеств, то из этой системы можно выделить конечную подсистему* $\overline{\Sigma}$ *множеств, которая также покрывает сегмент* $[a, b]$.

Доказательство [4]). Пусть $\{x\}$ — множество таких точек сегмента $[a, b]$, что если x принадлежит этому множеству, то сегмент $[a, x]$ покрывается некоторой конечной подсистемой Σ' множеств системы Σ. Докажем, что множество $\{x\}$ совпадает с сегментом $[a, b]$. Так как точка a покрыта некоторым множеством системы Σ и это множество открытое, то оно покрывает также некоторый сегмент $[a, x]$, все точки которого, согласно вышесказанному, принадлежат множеству $\{x\}$. Множество $\{x\}$, очевидно, ограничено. Пусть $\overline{x} = \sup\{x\}$. Убедимся, что $\overline{x}$ принадлежит множеству $\{x\}$ и что $\overline{x} = b$. В самом деле, $\overline{x}$ покрыто некоторым множеством системы Σ и, следовательно, этим же множеством покрыты все точки некоторого интервала $(\overline{x} - \varepsilon, \overline{x} + \varepsilon)$. Так как $\overline{x} = \sup\{x\}$, то имеются точки множества $\{x\}$, как угодно близкие к $\overline{x}$, и поэтому найдется точка x' этого множества, принадлежащая интервалу $(\overline{x} - \varepsilon, \overline{x} + \varepsilon)$. Из определения множества $\{x\}$ вытекает, что сегмент $[a, x']$ покрывается некоторой конечной подсистемой Σ' множеств системы Σ. Присоединяя к Σ' множество, покрывающее точку $\overline{x}$, мы получим конечную подсистему $\overline{\Sigma}$ множеств системы Σ, которая покрывает сегмент $[a, \overline{x}]$. Следовательно, $\overline{x}$ принадлежит $\{x\}$. Если допустить, что $\overline{x} < b$, то подсистема $\overline{\Sigma}$ покрывала бы все точки некоторого сегмента $[a, x'']$, где $\overline{x} < x'' < \overline{x} + \varepsilon$, и поэтому точка x'' принадлежала бы множеству $\{x\}$. Но этого не может быть, так как $\overline{x}$ — точная верхняя грань множества $\{x\}$. Таким образом, множество $\{x\}$ совпадает с сегментом $[a, b]$. Лемма доказана.

---

[1]) Определение ограниченного множества дано в п. 6 § 4 гл. 3.

[2]) Если множество $\{x\}$ состоит из одной точки, а система Σ содержит лишь одно открытое множество, то мы будем говорить, что это множество *покрывает* указанную точку.

[3]) Э. Гейне (1821–1881) — немецкий математик. Эмиль Борель (1871–1956) — французский математик.

[4]) Это доказательство леммы Гейне–Бореля принадлежит французскому математику Анри Лебегу (1875–1941). Отметим, что Лебегом был указан и обоснован более общий, чем излагаемый в этой главе, подход к проблеме интегрирования. Соответствующее понятие интеграла носит наименование интеграла Лебега.

З а м е ч а н и е. Можно следующим образом обобщить лемму Гейне–Бореля. *Если замкнутое* [1]) *ограниченное множество* $\{x\}$ *покрыто бесконечной системой* Σ *открытых множеств, то из этой системы можно выделить конечную подсистему* $\overline{\Sigma}$ *множеств, которая также покрывает множество* $\{x\}$. Дадим теперь другое доказательство теоремы 10.2.

Д о к а з а т е л ь с т в о т е о р е м ы о р а в н о м е р н о й н е п р е р ы в н о с т и. Продолжим $f(x)$ на всю прямую, положив ее равной $f(b)$ при $x > b$ и равной $f(a)$ при $x < a$. Так как $f(x)$ непрерывна в каждой точке сегмента $[a, b]$, то для любой точки x этого сегмента и любого заданного $\varepsilon > 0$ можно указать такое $\delta' > 0$, зависящее, вообще говоря, от x, что для всех точек x', удовлетворяющих условию $|x' - x| < \delta'$, выполняется неравенство $|f(x') - f(x)| < \varepsilon/2$. Таким образом, сегмент $[a, b]$ покрыт бесконечной системой Σ интервалов $(x - \delta'/2, x + \delta'/2)$ [2]), из которой можно выделить, в силу леммы Гейне–Бореля, конечную подсистему $\overline{\Sigma}$ интервалов, также покрывающую сегмент $[a, b]$. Пусть δ — минимальное значение $\delta'/2$ для этой конечной подсистемы $\overline{\Sigma}$ интервалов. Пусть теперь x' и x'' — любые точки сегмента $[a, b]$, удовлетворяющие условию $|x'' - x'| < \delta$, и x — центр того интервала $(x - \delta'/2, x + \delta'/2)$, $\delta \leqslant \delta'/2$, системы $\overline{\Sigma}$, который покрывает точку x'. Так как $|x' - x| < \delta'/2 < \delta'$ и $|x'' - x| < \delta'$, то $|f(x') - f(x)| < \varepsilon/2$ и $|f(x'') - f(x)| < \varepsilon/2$ и поэтому

$$|f(x'') - f(x')| \leqslant |f(x'') - f(x)| + |f(x') - f(x)| < \varepsilon/2 + \varepsilon/2 = \varepsilon.$$

Итак, для любого заданного $\varepsilon > 0$ мы указали такое $\delta > 0$, что для любых точек x' и x'' сегмента $[a, b]$, удовлетворяющих условию $|x'' - x'| < \delta$, выполняется неравенство $|f(x'') - f(x')| < \varepsilon$. Следовательно, функция $f(x)$ равномерно непрерывна на сегменте $[a, b]$. Теорема доказана.

3. Интегрируемость непрерывных функций. Докажем следующую *основную* теорему.

Теорема 10.3. *Непрерывная на сегменте* $[a, b]$ *функция* $f(x)$ *интегрируема на этом сегменте.*

Д о к а з а т е л ь с т в о. Пусть дано любое $\varepsilon > 0$. В силу равномерной непрерывности функции $f(x)$ на сегменте $[a, b]$ для положительного числа $\varepsilon/(b - a)$ можно указать такое $\delta > 0$, что при разбиении T сегмента $[a, b]$ на частичные сегменты $[x_{i-1}, x_i]$, длины Δx_i которых меньше δ, колебание ω_i функции $f(x)$ на каждом таком частичном сегменте будут меньше $\varepsilon/(b - a)$ (см. следствие из теоремы 10.2). Поэтому для таких разбиений T

$$S - s = \sum_{i=1}^{n} \omega_i \Delta x_i < \frac{\varepsilon}{b - a} \sum_{i=1}^{n} \Delta x_i = \varepsilon.$$

Следовательно, для непрерывной на сегменте $[a, b]$ функции $f(x)$ выполнены достаточные условия интегрируемости.

---

[1]) См. замечание в предыдущем пункте.

[2]) Мы берем интервалы $(x - \delta'/2,\ x + \delta'/2)$ вместо $(x - \delta',\ x + \delta')$ для удобства дальнейших рассуждений.

4. Интегрируемость некоторых разрывных функций. Мы будем говорить, что точка x покрыта интервалом, если эта точка принадлежит указанному интервалу. Докажем следующую теорему.

Теорема 10.4. *Если функция $f(x)$ определена и ограничена на сегменте $[a, b]$ и если для любого положительного числа ε можно указать конечное число интервалов, покрывающих все точки разрыва этой функции и имеющих общую сумму длин меньше ε, то $f(x)$ интегрируема на сегменте $[a, b]$.*

Доказательство. Пусть дано любое $\varepsilon > 0$. Покроем точки разрыва функции $f(x)$ конечным числом интервалов, сумма длин которых меньше $\dfrac{\varepsilon}{2(M-m)}$, где M и m — точные верхняя и нижняя грани $f(x)$ на сегменте $[a, b]$ (случай $M = m$ можно исключить, так как тогда $f(x) \equiv c \equiv \text{const}$). Точки сегмента, не принадлежащие указанным интервалам, образуют множество, состоящее из конечного числа непересекающихся сегментов. На каждом из них функция $f(x)$ непрерывна и поэтому равномерно непрерывна. Разобьем каждый такой сегмент так, чтобы колебание ω_i функции $f(x)$ на любом частичном сегменте разбиения было меньше $\dfrac{\varepsilon}{2(b-a)}$. Объединяя эти разбиения и интервалы, покрывающие точки разрыва функции $f(x)$, мы получим разбиение T всего сегмента $[a, b]$. Для этого разбиения слагаемые суммы $\sum\limits_{i=1}^{n} \omega_i \Delta x_i$ (равной $S - s$) разделяются на две группы $\sum' \omega_i \Delta x_i$ и $\sum'' \omega_i \Delta x_i$, причем в первую группу входят все слагаемые, отвечающие частям разбиения T, образованным из интервалов, покрывающих точки разрыва, а во вторую — остальные слагаемые. Так как колебания $\omega_i = M_i - m_i$ для слагаемых первой группы удовлетворяют неравенству $\omega_i \leqslant M - m$, то

$$\sum{}' \omega_i \Delta x_i \leqslant (M - m) \sum{}' \Delta x_i < (M - m) \frac{\varepsilon}{2(M - m)} = \frac{\varepsilon}{2}.$$

Для слагаемых второй группы $\omega_i < \dfrac{\varepsilon}{2(b-a)}$. Поэтому

$$\sum{}'' \omega_i \Delta x_i < \frac{\varepsilon}{2(b-a)} \sum{}'' \Delta x_i \leqslant \frac{\varepsilon}{2(b-a)} (b - a) = \frac{\varepsilon}{2}.$$

Таким образом,

$$S - s = \sum_{i=1}^{n} \omega_i \Delta x_i = \sum{}' \omega_i \Delta x_i + \sum{}'' \omega_i \Delta x_i < \varepsilon.$$

Итак, для указанной в условии теоремы функции $f(x)$ выполнены достаточные условия интегрируемости. Теорема доказана.

Следствие. *Ограниченная на сегменте $[a,b]$ функция $f(x)$, имеющая лишь конечное число точек разрыва, интегрируема на этом сегменте*[1]. *В частности, кусочно непрерывная на данном сегменте функция интегрируема на этом сегменте.*

Замечание. Очевидно, что если функция $f(x)$ интегрируема на сегменте $[a,b]$, а функция $g(x)$ отличается от функции $f(x)$ лишь в конечном числе точек, то функция $g(x)$ также интегрируема на сегменте $[a,b]$, причем $\int\limits_a^b f(x)\,dx = \int\limits_a^b g(x)\,dx$.

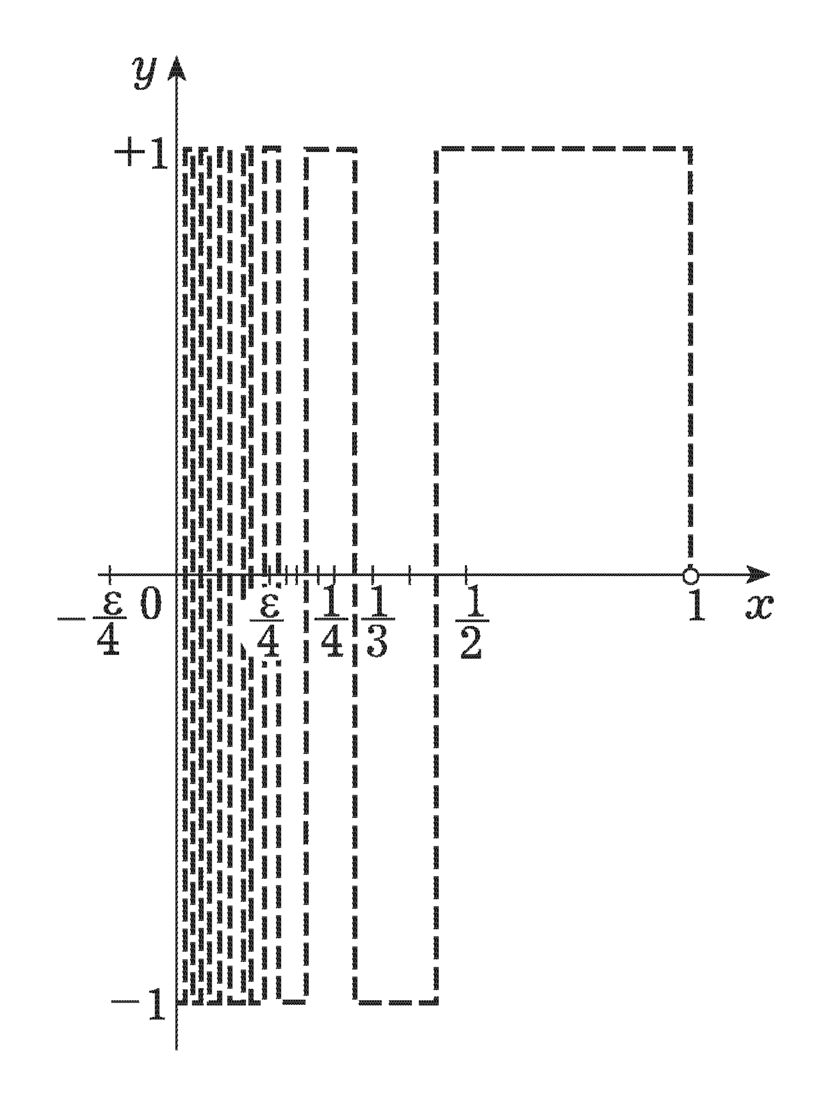


Рис. 10.4

Рассмотрим пример интегрируемой функции, имеющей *бесконечное* число точек разрыва. Пусть на сегменте $[0,1]$ задана функция $f(x)$ (рис. 10.4)

$$f(x) = \begin{cases} 1 \text{ на полусегментах } \left(\frac{1}{2n}, \frac{1}{2n-1}\right], & n = 1, 2, \ldots, \\ -1 \text{ на полусегментах } \left(\frac{1}{2n+2}, \frac{1}{2n}\right], & n = 1, 2, \ldots, \\ \text{в точке } x = 0. \end{cases}$$

Указанная функция имеет разрывы 1-го рода во *всех* точках $x_n = 1/n$, $n = 2, 3, \ldots$ Фиксируем любое $\varepsilon > 0$. Покроем точку $x = 0$ (в любой окрестности этой точки находится бесконечное число точек разрыва функции) интервалом $(-\varepsilon/4, \varepsilon/4)$. Вне этого интервала находится лишь конечное число p[2] точек разрыва функции, каждую из которых мы покроем интервалом длины меньше $\frac{\varepsilon}{2p}$. Сумма длин интервалов, покрывающих все точки разрыва рассматриваемой функции, меньше $\frac{\varepsilon}{2} + p\frac{\varepsilon}{2p} = \varepsilon$. Следовательно, функция $f(x)$ интегрируема на сегменте $[0,1]$.

---

[1]) Если p — число точек разрыва, то достаточно покрыть каждую точку разрыва интервалом длины $\varepsilon/2p$.

[2]) Это число p зависит, конечно, от ε.

5. Интегрируемость монотонных ограниченных функций.

Теорема 10.5. *Монотонная на сегменте* $[a, b]$ *функция* $f(x)$ *интегрируема на этом сегменте*[1]*.*

Доказательство. Ради определенности докажем теорему для неубывающей на сегменте $[a, b]$ функции $f(x)$. Зададимся произвольным положительным числом ε и разобьем сегмент $[a, b]$ на равные части, длины которых меньше $\dfrac{\varepsilon}{f(b) - f(a)}$ (случай $f(a) = f(b)$ можно исключить, так как тогда $f(x) = \text{const}$). Оценим для этого разбиения разность $S - s = \sum\limits_{i=1}^{n} \omega_i \Delta x_i$. Имеем

$$S - s = \sum_{i=1}^{n} \omega_i \Delta x_i < \frac{\varepsilon}{f(b) - f(a)} \sum_{i=1}^{n} \omega_i.$$

Но для неубывающей функции $\sum\limits_{i=1}^{n} \omega_i = f(b) - f(a)$, поэтому $S - s < \varepsilon$. Теорема доказана.

§ 5. Основные свойства определенного интеграла

Докажем справедливость следующих свойств определенного интеграла:

1°. Мы будем считать, что

$$\int_b^a f(x)\, dx = 0. \tag{10.6}$$

Отметим, что формула (10.6) должна рассматриваться как соглашение. Ее нужно рассматривать как естественное распространение понятия определенного интеграла на сегмент нулевой длины.

2°. Мы будем считать, что при $a < b$

$$\int_b^a f(x)\, dx = -\int_a^b f(x)\, dx. \tag{10.7}$$

Эта формула также должна рассматриваться как соглашение. Она представляет собой естественное обобщение понятия интеграла на случай, когда сегмент $[a, b]$ при $a < b$ пробегается

[1]) Отметим, что если функция монотонна на сегменте $[a, b]$, то ее значения заключены между $f(a)$ и $f(b)$. Поэтому определенная на сегменте $[a, b]$ монотонная функция ограничена на этом сегменте.

в направлении от b к a (в этом случае в интегральной сумме все разности $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$ имеют отрицательный знак).

3°. Пусть функции $f(x)$ и $g(x)$ интегрируемы на сегменте $[a, b]$. Тогда функции $f(x)+g(x)$, $f(x)-g(x)$ и $f(x)\,g(x)$ также интегрируемы на этом сегменте, причем

$$\int_a^b [f(x) \pm g(x)]\,dx = \int_a^b f(x)\,dx \pm \int_a^b g(x)\,dx. \qquad (10.8)$$

Докажем сначала интегрируемость функции $f(x) \pm g(x)$ и справедливость формулы (10.8). При любом разбиении сегмента $[a, b]$ и любом выборе точек ξ_i для интегральных сумм справедливо соотношение

$$\sum_{i=1}^{n} [f(\xi_i) \pm g(\xi_i)]\Delta x_i = \sum_{i=1}^{n} f(\xi_i)\Delta x_i \pm \sum_{i=1}^{n} g(\xi_i)\Delta x_i,$$

а поэтому из существования предела правой части следует существование предела левой части. Следовательно, функция $f(x) \pm$ $\pm\, g(x)$ интегрируема и имеет место формула (10.8).

Докажем теперь, что произведение интегрируемых функций является интегрируемой функцией. Так как функции $f(x)$ и $g(x)$ интегрируемы на сегменте $[a, b]$, то они и ограничены на этом сегменте (см. утверждение п. 1 § 1), так что $|f(x)| \leqslant A$ и $|g(x)| \leqslant B$. Рассмотрим любое заданное разбиение T сегмента $[a, b]$. Пусть x' и x'' — произвольные точки частичного сегмента $[x_{i-1}, x_i]$. Имеем тождество

$$f(x'')g(x'') - f(x')g(x') = \\ = [f(x'') - f(x')]g(x'') + [g(x'') - g(x')]f(x').$$

Так как

$$|f(x'')g(x'') - f(x')g(x')| \leqslant \omega_i, \qquad |f(x'') - f(x')| \leqslant \overline{\omega}_i,$$
$$|g(x'') - g(x')| \leqslant \overline{\overline{\omega}}_i,$$

где ω_i, $\overline{\omega}_i$, $\overline{\overline{\omega}}_i$ — соответственно колебания функций $f(x)\,g(x)$, $f(x)$, $g(x)$ на сегменте $[x_{i-1}, x_i]$, то, согласно указанному тождеству [1]),

$$\omega_i \leqslant B\overline{\omega}_i + A\overline{\overline{\omega}}_i.$$

Поэтому

$$\sum_{i=1}^{n} \omega_i \Delta x_i \leqslant B \sum_{i=1}^{n} \overline{\omega}_i \Delta x_i + A \sum_{i=1}^{n} \overline{\overline{\omega}}_i \Delta x_i.$$

---

[1]) В этом тождестве точки x' и x'' можно выбрать так, что левая часть будет как угодно мало отличаться от ω_i.

Поскольку $f(x)$ и $g(x)$ интегрируемы на сегменте $[a,b]$, для любого заданного $\varepsilon > 0$ можно указать такое разбиение T этого сегмента, что $\sum\limits_{i=1}^{n} \overline{\omega}_i \Delta x_i < \frac{\varepsilon}{2B}$ и $\sum\limits_{i=1}^{n} \overline{\overline{\omega}}_i \Delta x_i < \frac{\varepsilon}{2A}$. Следовательно, для этого разбиения

$$S - s = \sum_{i=1}^{n} \omega_i \Delta x_i < B\frac{\varepsilon}{2B} + A\frac{\varepsilon}{2A} = \varepsilon.$$

Поэтому произведение интегрируемых функций является интегрируемой функцией.

4°. Если функция $f(x)$ интегрируема на сегменте $[a,b]$, то функция $cf(x)$ $(c = \text{const})$ интегрируема на этом сегменте, причем

$$\int_a^b cf(x)\,dx = c\int_a^b f(x)\,dx. \tag{10.9}$$

Действительно, интегральные суммы функций $f(x)$ и $cf(x)$ отличаются постоянным множителем c. Поэтому функция $cf(x)$ интегрируема и справедлива формула (10.9).

5°. Пусть функция $f(x)$ интегрируема на сегменте $[a,b]$. Тогда эта функция интегрируема на любом сегменте $[c,d]$, содержащемся в сегменте $[a,b]$.

Так как функция $f(x)$ интегрируема на сегменте $[a,b]$, то для любого $\varepsilon > 0$ существует такое разбиение T сегмента $[a,b]$, что $S - s < \varepsilon$ (см. теорему 10.1). Добавим к точкам разбиения T точки c и d. В силу свойства 2° верхних и нижних сумм (см. п. 2 § 2) для полученного разбиения T^* тем более справедливо неравенство $S - s < \varepsilon$. Разбиение T^* сегмента $[a,b]$ порождает разбиение $\overline{T}$ сегмента $[c,d]$. Если $\overline{S}$ и $\overline{s}$ — верхняя и нижняя суммы разбиения $\overline{T}$, то $\overline{S} - \overline{s} \leqslant S - s$, поскольку каждое неотрицательное слагаемое $\omega_i \Delta x_i$ в выражении $\overline{S} - \overline{s} = \sum \omega_i \Delta x_i$ будет также слагаемым в выражении для $S - s$. Следовательно, $\overline{S} - \overline{s} < \varepsilon$, и поэтому функция $f(x)$ интегрируема на сегменте $[c,d]$.

6°. Пусть функция $f(x)$ интегрируема на сегментах $[a,c]$ и $[c,b]$. Тогда эта функция интегрируема на сегменте $[a,b]$, причем

$$\int_a^b f(x)\,dx = \int_a^c f(x)\,dx \int_c^b f(x)\,dx. \tag{10.10}$$

Рассмотрим сначала случай, когда $a < c < b$. Так как функция $f(x)$ интегрируема на сегментах $[a,c]$ и $[c,b]$, то существуют такие разбиения этих сегментов, что разность $S - s$ для каждого из них меньше $\varepsilon/2$. Объединяя эти разбиения, мы получим раз-

биение сегмента $[a, b]$, для которого разность $S - s$ будет меньше ε. Следовательно, функция $f(x)$ интегрируема на $[a, b]$. Будем включать точку c в число делящих точек сегмента $[a, b]$ при каждом его разбиении. Тогда интегральная сумма для $f(x)$ на $[a, b]$ равна сумме интегральных сумм для этой функции на $[a, c]$ и $[c, b]$. В пределе мы получим формулу (10.10).

Если точка c лежит вне сегмента $[a, b]$, то сегмент $[a, b]$ есть часть сегмента $[a, c]$ (или $[c, b]$) и поэтому, в силу свойства 5°, функция $f(x)$ интегрируема на $[a, b]$. Рассмотрим случай $a < b < c$. Тогда

$$\int_a^b f(x)\,dx + \int_b^c f(x)\,dx = \int_a^c f(x)\,dx.$$

Отсюда, используя свойство 2° и формулу (10.7), мы опять получим соотношение (10.10). Легко убедиться в справедливости этого соотношения и при $c < a < b$.

§ 6. Оценки интегралов. Формулы среднего значения

1. Оценки интегралов. В этом пункте мы получим некоторые оценки для определенных интегралов, подынтегральные функции которых подчинены тем или иным условиям.

1°. *Пусть интегрируемая на сегменте $[a, b]$ функция $f(x)$ неотрицательна на этом сегменте. Тогда*

$$\int_a^b f(x)\,dx \geqslant 0.$$

Действительно, каждая интегральная сумма такой функции неотрицательна, и поэтому предел $I = \int_a^b f(x)\,dx$ интегральных сумм также неотрицателен [1]).

Замечание 1. *Если $f(x)$ интегрируема на сегменте $[a, b]$ и $f(x) \geqslant m$, то*

$$\int_a^b f(x)\,dx \geqslant m(b-a).$$

[1]) Допустим, что предел I интегральных сумм отрицателен. Тогда согласно определению предела I, для числа $\varepsilon = |I|$ найдется интегральная сумма $I\{x_i, \xi_i\}$, для которой $|I\{x_i, \xi_i\} - I| < |I|$. Из этого неравенства вытекает, что $I\{x_i, \xi_i\} < 0$, а мы только что убедились, что каждая интегральная сумма неотрицательна. Следовательно, предел I неотрицателен.

В самом деле, функция $f(x)-m \geqslant 0$ и интегрируема на сегменте $[a,b]$. Поэтому $\int\limits_a^b [f(x)-m]\,dx \geqslant 0$. Отсюда

$$\int\limits_a^b f(x)\,dx \geqslant \int\limits_a^b m\,dx = m\int\limits_a^b dx = m(b-a)$$

(см. свойство 3° и пример из § 1).

2°. *Если функция $f(x)$ непрерывна, неотрицательна и не равна тождественно нулю на сегменте $[a,b]$, то*

$$\int\limits_a^b f(x)\,dx \geqslant c > 0.$$

Действительно, так как функция $f(x)$ неотрицательна и не равна тождественно нулю, то на сегменте $[a,b]$ найдется такая точка ξ, что $f(\xi)=2k>0$. Тогда по теореме об устойчивости знака непрерывной функции можно найти такой сегмент $[p,q]$, содержащий точку ξ, в пределах которого значения функции $f(x)$ будут не меньше числа $k>0$. Поэтому, в силу только что сделанного замечания,

$$\int\limits_p^q f(x)\,dx \geqslant k(q-p) > 0.$$

Согласно свойству 6° определенных интегралов

$$\int\limits_a^b f(x)\,dx = \int\limits_a^p f(x)\,dx + \int\limits_p^q f(x)\,dx + \int\limits_q^b f(x)\,dx.$$

Поэтому, поскольку $f(x)\geqslant 0$ и $\int\limits_p^q f(x)\,dx \geqslant c>0$, где $c=k(p-q)$,

$$\int\limits_a^b f(x)\,dx \geqslant c > 0.$$

3°. *Если функции $f(x)$ и $g(x)$ интегрируемы на сегменте $[a,b]$ и $f(x)\geqslant g(x)$ всюду на этом сегменте, то*

$$\int\limits_a^b f(x)\,dx \geqslant \int\limits_a^b g(x)\,dx.$$

Действительно, функция $f(x) - g(x) \geqslant 0$ и интегрируема на сегменте $[a, b]$. Отсюда, в силу свойства 1°, и вытекает справедливость указанной оценки.

З а м е ч а н и е 2. *Если функция $f(x)$ интегрируема на сегменте $[a, b]$, то функция $|f(x)|$ также интегрируема на этом сегменте, причем*

$$\left|\int_a^b f(x)\,dx\right| \leqslant \int_a^b |f(x)|\,dx.$$

Докажем сначала интегрируемость модуля $|f(x)|$ интегрируемой функции $f(x)$. Обозначим через M_i и m_i точные грани $f(x)$ на сегменте $[x_{i-1}, x_i]$, а через M_i' и m_i' точные грани $|f(x)|$ на том же сегменте. Легко убедиться в том, что $M_i' - m_i' \leqslant M_i - m_i$ (достаточно рассмотреть три возможных случая: 1) случай, когда M_i и m_i неотрицательны; 2) случай, когда M_i и m_i неположительны; 3) случай, когда $M_i > 0$, $m_i \leqslant 0$). Из полученного неравенства вытекает, что $S' - s' \leqslant S - s$. Таким образом, если для некоторого разбиения $S - s < \varepsilon$, то для этого разбиения $S' - s' < \varepsilon$, т. е. для $|f(x)|$ выполнено достаточное условие интегрируемости [1]).

Докажем теперь интересующую нас оценку. Так как $-|f(x)| \leqslant f(x) \leqslant |f(x)|$, то $-\int_a^b |f(x)|\,dx \leqslant \int_a^b f(x)\,dx \leqslant \int_a^b |f(x)|\,dx$, а это и означает, что $\left|\int_a^b f(x)\,dx\right| \leqslant \int_a^b |f(x)|\,dx$.

4°. *Пусть функции $f(x)$ и $g(x)$ интегрируемы на сегменте $[a, b]$ и $g(x) \geqslant 0$. Тогда, если M и m — точные грани $f(x)$ на сегменте $[a, b]$, то*

$$m\int_a^b g(x)\,dx \leqslant \int_a^b f(x)g(x)\,dx \leqslant M\int_a^b g(x)\,dx. \tag{10.11}$$

Справедливость (10.11) вытекает из того, что для всех x из сегмента $[a, b]$ справедливы неравенства $mg(x) \leqslant f(x)g(x) \leqslant$

---

[1]) Из интегрируемости функции $|f(x)|$ не следует, вообще говоря, интегрируемость $f(x)$. Например, функция $f(x) = \begin{cases} 1 & \text{для рациональных } x, \\ -1 & \text{для иррациональных } x, \end{cases}$ неинтегрируема на сегменте $[0, 1]$, тогда как $|f(x)| \equiv 1$ — интегрируемая на этом сегменте функция.

$\leqslant Mg(x)$ (см. оценку 3° из настоящего пункта и свойство 4° из § 5).

З а м е ч а н и е 3. В дополнении 1 к этой главе мы получим несколько важных неравенств для сумм и определенных интегралов.

2. Первая формула среднего значения. *Пусть функция $f(x)$ интегрируема на сегменте $[a,b]$, и пусть m и M — точные грани $f(x)$ на сегменте $[a,b]$. Тогда найдется такое число μ, удовлетворяющее неравенствам $m \leqslant \mu \leqslant M$, что*

$$\int_a^b f(x)\,dx = \mu(b-a). \tag{10.12}$$

В самом деле, полагая $g(x)=1$ и учитывая, что $\int_a^b 1\cdot dx = b-a$ (см. пример п. 1 § 1), получим из (10.11)

$$m(b-a) \leqslant \int_a^b f(x)\,dx \leqslant M(b-a).$$

Обозначая через μ число $\dfrac{1}{b-a}\int_a^b f(x)\,dx$, мы и получим формулу (10.12).

Если функция $f(x)$ *непрерывна* на сегменте $[a,b]$, то существуют такие точки p и q этого сегмента, что $f(p)=m$ и $f(q)=M$ (см. теорему 8.8), и поэтому, в силу теоремы 8.6, на сегменте $[p,q]$, а стало быть, и на $[a,b]$ найдется точка ξ такая, что $f(\xi)=\mu$. В этом случае формула (10.12) примет вид

$$\int_a^b f(x)\,dx = f(\xi)(b-a). \tag{10.13}$$

Эта формула называется *первой формулой среднего значения.*

3. Первая формула среднего значения в обобщенной форме. Докажем следующее утверждение. *Пусть функции $f(x)$ и $g(x)$ интегрируемы на сегменте $[a,b]$, и пусть m и M — точные грани $f(x)$ на сегменте $[a,b]$. Пусть, кроме того, функция $g(x)\geqslant 0$ (или $g(x)\leqslant 0$) на всем сегменте $[a,b]$. Тогда найдется такое число μ, удовлетворяющее неравенствам $m\leqslant\mu\leqslant M$, что*

$$\int_a^b f(x)g(x)\,dx = \mu\int_a^b g(x)\,dx. \tag{10.14}$$

В частности, если $f(x)$ непрерывна на сегменте $[a,b]$, то на этом сегменте существует такое число ξ, что

$$\int\limits_a^b f(x)g(x)\,dx = f(\xi)\int\limits_a^b g(x)\,dx. \tag{10.15}$$

Формула (10.15) называется *первой формулой среднего значения в обобщенной форме.*

Докажем справедливость формулы (10.14). Если $\int\limits_a^b g(x)\,dx = 0$, то, в силу неравенств (10.11), $\int\limits_a^b f(x)g(x)\,dx = 0$ и поэтому в качестве μ мы можем взять любое число. Если $\int\limits_a^b g(x)\,dx > 0$, то, разделив все части неравенств (10.11) на $\int\limits_a^b g(x)\,dx$, получим

$$m \leqslant \frac{\int\limits_a^b f(x)g(x)\,dx}{\int\limits_a^b g(x)\,dx} \leqslant M.$$

Полагая μ равным $\dfrac{\int\limits_a^b f(x)g(x)\,dx}{\int\limits_a^b g(x)\,dx}$, мы и получим формулу (10.14).

Если $f(x)$ непрерывна на сегменте $[a,b]$, то, каково бы ни было число μ, заключенное между m и M, на этом сегменте найдется точка ξ такая, что $f(\xi) = \mu$, т. е. формула (10.14) переходит в формулу (10.15).

Замечание 4. Если функция $f(x)$ не является непрерывной, то формула (10.15), вообще говоря, неверна. В самом деле, пусть, например,

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} \text{ при } 0 \leqslant x \leqslant \frac{1}{2}, \\ 1 \text{ при } \frac{1}{2} < x \leqslant 1, \end{cases} \qquad g(x) = \begin{cases} 1 \text{ при } 0 \leqslant x \leqslant \frac{1}{2}, \\ \frac{1}{2} \text{ при } \frac{1}{2} < x \leqslant 1. \end{cases}$$

Тогда, как легко убедиться, число μ в формуле (10.14) равно $2/3$. Таким образом, для любого ξ из сегмента $[0,1]$ $f(\xi) \neq \mu$.

4. Вторая формула среднего значения. Справедливо следующее утверждение. *Если на сегменте $[a,b]$ функция $g(x)$*

монотонна, а $f(x)$ интегрируема, то на этом сегменте существует такое число ξ, что

$$\int_a^b f(x)g(x)\,dx = g(a)\int_a^\xi f(x)\,dx + g(b)\int_\xi^b f(x)\,dx. \qquad (10.16)$$

Формула (10.16) называется *второй формулой среднего значения* или *формулой Бонне*[1]. Сформулированное утверждение доказывается в дополнении 2 к настоящей главе.

§ 7. Существование первообразной для непрерывной функции. Основные правила интегрирования

1. Существование первообразной для непрерывной функции. Прежде чем перейти к доказательству теоремы о существовании первообразной для непрерывной функции, введем понятие *интеграла с переменным верхним пределом.*

Пусть функция $f(x)$ интегрируема на любом сегменте, содержащемся в интервале (a, b), и пусть c — некоторая фиксированная точка этого интервала. Тогда, каково бы ни было число x из интервала (a, b), функция $f(x)$ интегрируема на сегменте $[c, x]$. Поэтому на интервале (a, b) определена функция

$$F(x) = \int_c^x f(t)\,dt\,[2],$$

которую называют *интегралом с переменным верхним пределом.* Докажем следующую теорему.

Теорема 10.6. *Любая непрерывная на интервале (a, b) функция $f(x)$ имеет на этом интервале первообразную. Одной из первообразных является функция*

$$F(x) = \int_c^x f(t)\,dt,$$

где c — любая фиксированная точка интервала (a, b).

Доказательство. Достаточно доказать, что для любого фиксированного x из интервала (a, b) существует предельное значение $\lim\limits_{\Delta x\to 0} \dfrac{F(x+\Delta x) - F(x)}{\Delta x}$, причем это предельное значение

[1] Бонне (1819–1892) — французский математик.

[2] Мы обозначили переменную интегрирования буквой t, поскольку буквой x обозначен верхний предел интегрирования.

равно $f(x)$. Имеем, в силу свойства 6° определенных интегралов (см. § 5) [1]),

$$F(x+\Delta x)-F(x)=\int\limits_c^{x+\Delta x} f(t)\,dt-\int\limits_c^{x} f(t)\,dt=$$

$$=\int\limits_c^{x} f(t)\,dt+\int\limits_x^{x+\Delta x} f(t)\,dt-\int\limits_c^{x} f(t)\,dt=\int\limits_x^{x+\Delta x} f(t)\,dt.$$

По формуле (10.13) среднего значения находим

$$F(x+\Delta x)-F(x)=\int\limits_x^{x+\Delta x} f(t)\,dt=f(\xi)\Delta x,$$

где ξ — число, заключенное между числами x и $x+\Delta x$. Поскольку функция $f(x)$ непрерывна в точке x, то при $\Delta x\to 0$ $f(\xi)\to f(x)$. Поэтому из последней формулы находим

$$\lim_{\Delta x\to 0}\frac{F(x+\Delta x)-F(x)}{\Delta x}=\lim_{\Delta x\to 0} f(\xi)=f(x).$$

Теорема доказана.

З а м е ч а н и е 1. Аналогично доказывается теорема о существовании первообразной у непрерывной *на сегменте* $[a,b]$ функции. Отметим, что в этом случае в качестве нижнего предела интегрирования c можно взять a.

З а м е ч а н и е 2. При доказательстве теоремы 10.6 мы установили существование производной от интеграла с переменным верхним пределом и доказали, что эта производная равна подынтегральной функции

$$\frac{d}{dx}\left(\int\limits_c^{x} f(t)\,dt\right)=f(x). \tag{10.17}$$

З а м е ч а н и е 3. Отметим, что если функция $f(x)$ интегрируема на любом сегменте, содержащемся в интервале (a,b), то интеграл с переменным верхним пределом представляет собой непрерывную на интервале (a,b) функцию от верхнего предела. Чтобы убедиться в этом, докажем, что приращение $\Delta F=F(x+$ $+\Delta x)-F(x)$ функции $F(x)=\int\limits_c^x f(t)\,dt$ стремится к нулю при

[1]) Приращение Δx мы берем столь малым, что $(x+\Delta x)$ принадлежит (a,b).

$\Delta x \to 0$. Имеем, в силу формулы (10.12),

$$\Delta F = F(x+\Delta x) - F(x) = \int\limits_{x}^{x+\Delta x} f(t)\,dt = \mu\Delta x,$$

где число μ заключено между точной верхней и нижней гранями функции $f(x)$ на сегменте $[x, x+\Delta x]$. Из последней формулы вытекает, что и $\Delta F \to 0$ при $\Delta x \to 0$.

Замечание 4. Интеграл с переменным верхним пределом часто используется для определения новых функций. Мы уже отмечали в гл. 6, что первообразные некоторых элементарных функций не выражаются через элементарные функции и не являются поэтому элементарными функциями. Напомним, что к числу неэлементарных функций относятся, например, функции $\int\limits_0^x e^{-t^2}\,dt$, $\int\limits_0^x \cos t^2 dt$.

2. Основная формула интегрального исчисления. Мы доказали, что любые две первообразные данной функции $f(x)$ отличаются на постоянную (см. теорему 6.1). Поэтому, согласно теореме 10.6 и замечанию 1 к этой теореме, можно утверждать, что любая первообразная $\Phi(x)$ непрерывной на сегменте $[a, b]$ функции $f(x)$ имеет вид

$$\Phi(x) = \int\limits_{a}^{x} f(t)\,dt + C,$$

где C — некоторая постоянная.

Полагая в последней формуле сначала $x = a$, а затем $x = b$ и используя свойство 1° определенных интегралов, найдем

$$\Phi(a) = C, \qquad \Phi(b) = \int\limits_{a}^{b} f(x)\,dx + C$$ [1].

Из этих равенств вытекает соотношение

$$\int\limits_{a}^{b} f(x)\,dx = \Phi(b) - \Phi(a), \tag{10.18}$$

называемое *основной формулой интегрального исчисления*[2].

---

[1] В этой формуле переменную интегрирования мы обозначили буквой x, поскольку верхний предел имеет фиксированное значение b.

[2] Эту формулу называют также *формулой Ньютона–Лейбница*.

Итак, *для вычисления определенного интеграла от непрерывной функции $f(x)$ нужно составить разность значений произвольной ее первообразной для верхнего и нижнего пределов интегрирования.*

Отметим, что основная формула интегрального исчисления открывает широкие возможности для вычисления определенных интегралов, поскольку задача вычисления определенного интеграла сводится к задаче разыскания первообразной функции. Методы разыскания первообразных были достаточно полно разработаны нами в главах 6 и 7 этого курса.

Так как во многих случаях разыскание первообразных представляет собой трудную задачу, естественно поставить вопрос о приближенных методах вычисления определенных интегралов. В гл. 12 будут указаны некоторые методы приближенного вычисления определенных интегралов.

Формулу (10.18) иногда записывают в иной форме. Именно, разность $\Phi(b) - \Phi(a)$ обозначают символом $\Phi(x)|_a^b$. Тогда

$$\int_a^b f(x)\,dx = \Phi(x)\Big|_a^b. \tag{10.19}$$

Рассмотрим несколько примеров:

1) $\displaystyle\int_a^b \sin x\,dx = -\cos x\Big|_a^b = \cos a - \cos b;$

2) $\displaystyle\int_1^2 \frac{dx}{x} = \ln x\Big|_1^2 = \ln 2 - \ln 1 = \ln 2;$

3) $\displaystyle\int_0^1 e^{-x}\,dx = -e^{-x}\Big|_0^1 = 1 - \frac{1}{e};$

4) $\displaystyle\int_0^1 \frac{dx}{1+x^2} = \operatorname{arctg} x\Big|_0^1 = \frac{\pi}{4};$

5) $\displaystyle\int_0^{1/2} \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = \arcsin x\Big|_0^{\frac{1}{2}} = \frac{\pi}{6};$

6) $\displaystyle\int_0^3 \frac{dx}{\sqrt{1+x^2}} = \ln\left(x + \sqrt{1+x^2}\right)\Big|_0^3 = \ln\left(3 + \sqrt{10}\right).$

3. Замена переменной под знаком определенного интеграла. Пусть выполнены следующие условия:

1) *функция* $f(x)$ *непрерывна на сегменте* $[a, b]$;

2) *сегмент* $[a, b]$ *является множеством значений некоторой функции* $x = g(t)$, *определенной на сегменте* $\alpha \leqslant t \leqslant \beta$ *и имеющей на этом сегменте непрерывную производную*;

3) $g(\alpha) = a$, $g(\beta) = b$.

При этих условиях справедлива формула

$$\int_a^b f(x)\,dx = \int_\alpha^\beta f[g(t)]g'(t)\,dt. \tag{10.20}$$

Формула (10.20) показывает, что если вычислен интеграл, стоящий в левой части этой формулы, то вычислен и интеграл, стоящий в правой части, и наоборот. Указанная формула называется *формулой замены переменной под знаком определенного интеграла.*

Рассмотрим некоторую первообразную $\Phi(x)$ функции $f(x)$. По формуле (10.18) имеем

$$\int_a^b f(x)\,dx = \Phi(b) - \Phi(a). \tag{10.21}$$

Так как функции $\Phi(x)$ и $x = g(t)$ дифференцируемы на соответствующих сегментах, то сложная функция $\Phi(g(t))$ дифференцируема на сегменте $[\alpha, \beta]$. Поэтому, применяя правило дифференцирования сложной функции, получим

$$\frac{d}{dt}\Phi(g(t)) = \Phi'(g(t))g'(t), \tag{10.22}$$

причем производная Φ' вычисляется по аргументу x: $\Phi'(g(t)) = \Phi'(x)$, где $x = g(t)$. Поскольку $\Phi'(x) = f(x)$, то при $x = g(t)$ получим $\Phi'(g(t)) = f(g(t))$. Подставляя это значение $\Phi'(g(t))$ в правую часть равенства (10.22), получим

$$\frac{d}{dt}\Phi(g(t)) = f(g(t))g'(t).$$

Следовательно, функция $\Phi(g(t))$, определенная и непрерывная на сегменте $[\alpha, \beta]$, является на этом сегменте первообразной для функции $f(g(t))g'(t)$, и поэтому, согласно формуле (10.18),

$$\int_\alpha^\beta f(g(t))g'(t)\,dt = \Phi(g(\beta)) - \Phi(g(\alpha)).$$

Так как $g(\beta) = b$, а $g(\alpha) = a$, то

$$\int_{\alpha}^{\beta} f(g(t))g'(t)\,dt = \Phi(b) - \Phi(a).$$

Сравнивая последнюю формулу с формулой (10.21), мы убеждаемся в справедливости формулы (10.20).

Примеры. 1) Рассмотрим интеграл $\int_1^2 \ln x \frac{dx}{x}$. Положим $x = e^t$. Так как $t = 0$ при $x = 1$, $t = \ln 2$ при $x = 2$, то

$$\int_1^2 \ln x \frac{dx}{x} = \int_0^{\ln 2} t\,dt = \frac{t^2}{2}\Big|_0^{\ln 2} = \frac{1}{2}\ln^2 2.$$

2) Рассмотрим интеграл $\int_{\pi^2/4}^{\pi^2} \sin\sqrt{x}\frac{dx}{\sqrt{x}}$. Пусть $x = t^2$. Тогда $x = \pi^2/4$ при $t = \pi/2$, $x = \pi^2$ при $t = \pi$. Поэтому

$$\int_{\pi^2/4}^{\pi^2} \sin\sqrt{x}\frac{dx}{\sqrt{x}} = 2\int_{\pi/2}^{\pi} \sin t\,dt = -2\cos t\Big|_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} = 2.$$

4. Формула интегрирования по частям. *Пусть функции $u(x)$ и $v(x)$ имеют непрерывные производные на сегменте $[a, b]$. Тогда имеет место следующая формула интегрирования по частям для определенных интегралов*:

$$\int_a^b u(x)v'(x)\,dx = [u(x)v(x)]\big|_a^b - \int_a^b v(x)u'(x)\,dx. \qquad (10.23)$$

Так как $v'(x)\,dx = dv$ и $u'(x)\,dx = du$, то эту формулу записывают еще следующим образом:

$$\int_a^b u\,dv = [uv]\big|_a^b - \int_a^b v\,du. \qquad (10.24)$$

В справедливости этих формул убедиться нетрудно. Действительно, функция $u(x)v(x)$ является первообразной для функции

$u(x)v'(x) + v(x)u'(x)$. Поэтому, в силу (10.19):

$$\int_a^b [u(x)v'(x) + v(x)u'(x)]\,dx = [u(x)v(x)]\Big|_a^b.$$

Отсюда, используя свойство 3° определенных интегралов (см. § 5), мы и получим формулы (10.23) и (10.24).

Примеры.

1) $$\int_1^2 \ln x\,dx = x\ln x\Big|_1^2 - \int_1^2 x\frac{dx}{x}[x\ln x - x]\Big|_1^2 = 2\ln 2 - 1,$$

2) $$\int_1^2 xe^x\,dx = xe^x\Big|_1^2 - \int_1^2 e^x\,dx = e^x(x-1)\Big|_1^2 = e^2,$$

3) $$\int_0^1 \operatorname{arctg} x\,dx = x\operatorname{arctg} x\Big|_0^1 - \int_0^1 \frac{x\,dx}{1+x^2} =$$

$$= \left[x\operatorname{arctg} x - \frac{1}{2}\ln(1+x^2)\right]\Big|_0^1 = \frac{\pi}{4} - \ln\sqrt{2}.$$

5. Остаточный член формулы Тейлора в интегральной форме. Применим формулу (10.23) для вывода *формулы Тейлора функции $f(x)$ с остаточным членом в интегральной форме.* Пусть функция $f(x)$ имеет в некоторой ε-окрестности точки a непрерывную производную $(n+1)$-го порядка, и пусть x — любая данная точка из этой ε-окрестности. Убедимся, что число

$$R_{n+1}(x) = \frac{1}{n!}\int_a^x f^{(n+1)}(t)(x-t)^n\,dt \tag{10.25}$$

является остаточным членом формулы Тейлора для функции $f(x)$ с центром разложения в точке a. *Таким образом, формула* (10.25) *дает представление остаточного члена формулы Тейлора для функции $f(x)$ в интегральной форме.*

Для доказательства заметим, что

$$f(x) = f(a) + \int_a^x f'(t)\,dt.$$

К интегралу $\int_a^x f'(t)\,dt$ применим формулу (10.23) интегрирования по частям, полагая $u(t) = f'(t)$ и $v(t) = -(x-t)$ (так как x

фиксировано, то $v'dt = dt$). Имеем

$$\int_a^x f'(t)\,dt = -f'(t)(x-t)\Big|_a^x + \int_a^x f''(t)(x-t)\,dt =$$

$$= f'(a)(x-a) + \int_a^x f''(t)(x-t)\,dt.$$

Подставляя найденное выражение для $\int_a^x f'(t)\,dt$ в приведенную выше формулу для $f(x)$, получим

$$f(x) = f(a) + f'(a)(x-a) + \int_a^x f''(t)(x-t)\,dt.$$

К интегралу $\int_a^x f''(t)(x-t)\,dt$ также можно применить формулу интегрирования по частям, полагая $u(t) = f''(t)$ и $v(t) = -\frac{1}{2}(x-$ $-t)^2$ (так как x фиксировано, то $v'dt = (x-t)\,dt$). После несложных преобразований найдем

$$\int_a^x f''(t)(x-t)\,dt = \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \frac{1}{2!}\int_a^x f^{(3)}(t)(x-t)^2 dt,$$

и поэтому

$$f(x) = f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \frac{1}{2!}\int_a^x f^{(3)}(t)(x-t)^2 dt.$$

Дальнейшее интегрирование по частям будем производить до тех пор, пока не придем к формуле

$$f(x) = f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \ldots$$

$$\ldots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(x-a)^n + \frac{1}{n!}\int_a^x f^{(n+1)}(t)(x-t)^n dt.$$

Эта формула показывает, что $R_{n+1}(x)$ действительно является остаточным членом формулы Тейлора для функции $f(x)$ с центром разложения в точке a (см. § 13 гл. 8). Используя интегральную форму (10.25) остаточного члена формулы Тейлора,

легко получить остаточный член формулы Тейлора в форме Лагранжа. Именно по обобщенной форме (10.15) формулы среднего значения получим

$$R_{n+1}(x) = \frac{1}{n!}\int_a^x f^{(n+1)}(t)(x-t)^n dt = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{n!}\int_a^x (x-t)^n dt =$$

$$= -\frac{f^{(n+1)}(\xi)}{n!}\frac{(x-t)^{n+1}}{(n+1)}\Bigg|_a^x = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}(x-a)^{n+1}.$$

Полученное выражение и представляет собой остаточный член в форме Лагранжа [1] (см. формулу (8.46) из § 14 гл. 8).

ДОПОЛНЕНИЕ 1

НЕКОТОРЫЕ ВАЖНЫЕ НЕРАВЕНСТВА ДЛЯ СУММ И ИНТЕГРАЛОВ

1. Вывод одного предварительного неравенства. Пусть A и B — любые неотрицательные числа, а p и p' — любые два числа, оба превосходящие единицу и связанные соотношением $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = 1$ (такие числа будем называть *сопряженными*). Тогда

$$AB \leqslant \frac{A^p}{p} + \frac{B^{p'}}{p'}. \tag{10.26}$$

Найдем максимальное значение функции $f(x) = x^{1/p} - x/p$ на полупрямой $x \geqslant 0$. Поскольку $f'(x) = \frac{1}{p}(x^{1/p-1} - 1) = \frac{1}{p}(x^{-1/p'} - 1)$, то $f'(x) > 0$ при $0 < x < 1$ и $f'(x) < 0$ при $x > 1$. Поэтому функция имеет максимум в точке $x = 1$, причем ее максимальное значение $f(1) = 1 - \frac{1}{p} = \frac{1}{p'}$. Итак, для всех $x \geqslant 0$

$$x^{1/p} - \frac{x}{p} \leqslant \frac{1}{p'}.$$

Положив в последнем неравенстве $x = A^p B^{p'}$ [2] и умножив обе части этого неравенства на $B^{p'}$, получим неравенство (10.26).

---

[1]) Отметим, что при указанном выводе остаточного члена в форме Лагранжа на производную $(n+1)$-го порядка накладываются несколько большие ограничения, чем в § 14 гл. 8. Однако, если использовать доказанную в конце гл. 9 теорему Дарбу (о прохождении производной через все промежуточные значения), то получим остаточный член в форме Лагранжа лишь при условии существования и интегрируемости $f^{(n+1)}(x)$.

[2]) Здесь мы считаем, что $B > 0$, ибо при $B = 0$ справедливость неравенства (10.26) не вызывает сомнений.

2. Неравенство Гёльдера[1]) для сумм. Пусть $a_1, a_2, \ldots, a_n$ и $b_1, b_2, \ldots, b_n$ — какие угодно неотрицательные числа, а p и p' имеют тот же смысл, что и выше. Тогда справедливо следующее неравенство:

$$\sum_{i=1}^{n} a_i b_i \leqslant \left[\sum_{i=1}^{n} a_i^p\right]^{1/p} \left[\sum_{i=1}^{n} b_i^{p'}\right]^{1/p'}, \tag{10.27}$$

которое называется *неравенством Гёльдера для сумм.*

Докажем сначала, что если $A_1, A_2, \ldots, A_n$; $B_1, B_2, \ldots, B_n$ — какие угодно неотрицательные числа, удовлетворяющие неравенствам

$$\sum_{i=1}^{n} A_i^p \leqslant 1 \quad \text{и} \quad \sum_{i=1}^{n} B_i^{p'} \leqslant 1, \tag{10.28}$$

то для этих чисел справедливо неравенство

$$\sum_{i=1}^{n} A_i B_i \leqslant 1. \tag{10.29}$$

В самом деле, записывая для всех пар чисел A_i и B_i неравенства (10.26) и суммируя эти неравенства по всем i от 1 до n, получим

$$\sum_{i=1}^{n} A_i B_i \leqslant \frac{1}{p}\sum_{i=1}^{n} A_i^p + \frac{1}{p'}\sum_{i=1}^{n} B_i^{p'} \leqslant \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = 1.$$

Тем самым неравенство (10.29) доказано.

Положим теперь

$$A_i = \frac{a_i}{\left[\sum\limits_{i=1}^{n} a_i^p\right]^{1/p}}, \qquad B_i = \frac{b_i}{\left[\sum\limits_{i=1}^{n} b_i^{p'}\right]^{1/p'}} \; ^{2)}.$$

Легко видеть, что числа A_i и B_i удовлетворяют неравенствам (10.28), а поэтому для этих чисел справедливо неравенство (10.29), которое в данном случае можно записать так:

$$\frac{\sum\limits_{i=1}^{n} a_i b_i}{\left[\sum\limits_{i=1}^{n} a_i^p\right]^{1/p}\left[\sum\limits_{i=1}^{n} b_i^{p'}\right]^{1/p'}} \leqslant 1.$$

Из последнего неравенства вытекает неравенство Гёльдера (10.27).

З а м е ч а н и е. В частном случае $p = p' = 2$ неравенство Гёльдера переходит в следующее неравенство:

$$\sum_{i=1}^{n} a_i b_i \leqslant \sqrt{\sum_{i=1}^{n} a_i^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n} b_i^2}. \tag{10.30}$$

---

[1]) Гёльдер (1859–1937) — немецкий математик.

[2]) Мы считаем, что хотя бы одно из чисел a_i и хотя бы одно из чисел b_i отличны от нуля, ибо в противном случае формула (10.27) доказательства не требует.

Неравенство (10.30) называется *неравенством Буняковского*[1] *для сумм.*

3. Неравенство Минковского[2] **для сумм.** Пусть $a_1, a_2, \ldots, a_n$; $b_1, b_2, \ldots, b_n$ — какие угодно неотрицательные числа, а число $p > 1$. Тогда справедливо следующее неравенство:

$$\left[\sum_{i=1}^{n}(a_i + b_i)^p\right]^{1/p} \leqslant \left[\sum_{i=1}^{n} a_i^p\right]^{1/p} + \left[\sum_{i=1}^{n} b_i^p\right]^{1/p}, \tag{10.31}$$

называемое *неравенством Минковского для сумм.* Прежде всего преобразуем сумму, стоящую в левой части (10.31). Можно записать

$$\sum_{i=1}^{n}(a_i + b_i)^p = \sum_{i=1}^{n} a_i(a_i + b_i)^{p-1} + \sum_{i=1}^{n} b_i(a_i + b_i)^{p-1}.$$

К каждой из сумм, стоящих в правой части, применим неравенство Гёльдера. При этом, так как $(p-1)p' = p$ и $\dfrac{1}{p'} = \dfrac{p-1}{p}$, получим

$$\sum_{i=1}^{n}(a_i + b_i)^p \leqslant \left[\sum_{i=1}^{n} a_i^p\right]^{1/p} \left[\sum_{i=1}^{n}(a_i + b_i)^{(p-1)p'}\right]^{1/p'} +$$

$$+ \left[\sum_{i=1}^{n} b_i^p\right]^{1/p} \left[\sum_{i=1}^{n}(a_i + b_i)^{(p-1)p'}\right]^{1/p'} =$$

$$= \left\{\left[\sum_{i=1}^{n} a_i^p\right]^{1/p} + \left[\sum_{i=1}^{n} b_i^p\right]^{1/p}\right\} \left[\sum_{i=1}^{n}(a_i + b_i)^p\right]^{p-1/p}.$$

Поделив обе части последнего неравенства на $\left[\sum\limits_{i=1}^{n}(a_i + b_i)^p\right]^{p-1/p}$, получим неравенство Минковского (10.31).

4. Интегрируемость произвольной положительной степени модуля интегрируемой функции. Докажем следующую теорему.

Теорема 10.7. *Если функция $f(x)$ интегрируема на сегменте $[a, b]$, то и функция $|f(x)|^r$, где r — любое положительное вещественное число, также интегрируема на сегменте $[a, b]$.*

Доказательство. Достаточно доказать теорему для случая $r < 1$, ибо если $r > 1$, то функцию $|f(x)|^r$ можно представить в виде произведения $|f(x)|^{[r]}|f(x)|^{r-[r]}$, где $[r]$ — целая часть r, а $r - [r] < 1$. В силу замечания 2 п. 1 § 6 функция $|f(x)|$ интегрируема на сегменте $[a, b]$, а поэтому, в силу свойства 3° § 5, функция $|f(x)|^{[r]}$ интегрируема на этом сегменте. Но тогда, в силу того же свойства и интегрируемости функции $|f(x)|^{r-[r]}$, функция $|f(x)|^r$ также интегрируема на сегменте $[a, b]$. Итак, докажем теорему для случая $r < 1$. Положим $r = 1/p$ и заметим, что $p > 1$. Так как функция $|f(x)|$ интегрируема на сегменте $[a, b]$, то для любого $\varepsilon > 0$ найдется такое

[1] Виктор Яковлевич Буняковский (1804–1889) — русский математик.

[2] Герман Минковский (1864–1909) — немецкий математик и физик.

разбиение T этого сегмента, для которого

$$\sum_{i=1}^{n}(M_i - m_i)\Delta x_i < \varepsilon^p (b-a)^{(1-p)}. \tag{10.32}$$

Здесь через M_i и m_i обозначены точные грани функции $|f(x)|$ на частичном сегменте $[x_{i-1}, x_i]$. Достаточно доказать, что сумма

$$S - s = \sum_{i=1}^{n}(M_i^{1/p} - m_i^{1/p})\Delta x_i \tag{10.33}$$

меньше ε.

Оценим эту сумму с помощью неравенства Гёльдера (10.27), полагая в нем $a_i = (M_i^{1/p} - m_i^{1/p})(\Delta x_i)^{1/p}$, $b_i = (\Delta x_i)^{1/p'}$. Получим

$$S - s \leqslant \left[\sum_{i=1}^{n}(M_i^{1/p} - m_i^{1/p})^p \Delta x_i\right]^{1/p} \left[\sum_{i=1}^{n}\Delta x_i\right]^{1/p'}. \tag{10.34}$$

Докажем теперь, что

$$(M_i^{1/p} - m_i^{1/p})^p \leqslant (M_i - m_i). \tag{10.35}$$

Последнее неравенство посредством деления на M_i [1] приводится к следующему:

$$\left[1 - \left(\frac{m_i}{M_i}\right)^{1/p}\right]^p \leqslant 1 - \frac{m_i}{M_i}.$$

В справедливости последнего неравенства легко убедиться, учитывая, что $0 \leqslant \dfrac{m_i}{M_i} \leqslant 1$, а $p > 1$. Используя неравенство (10.35) и учитывая, что

$$\sum_{i=1}^{n}\Delta x_i = b - a,$$

мы получим из неравенства (10.34) следующее неравенство:

$$S - s \leqslant \left[\sum_{i=1}^{n}(M_i - m_i)\Delta x_i\right]^{1/p} (b-a)^{1/p'}.$$

Отсюда, используя неравенство (10.32) и учитывая, что $1/p + 1/p' = 1$, найдем

$$S - s < \varepsilon.$$

Теорема доказана.

5. Неравенство Гёльдера для интегралов. Пусть $f(x)$ и $g(x)$ — любые две интегрируемые на сегменте $[a, b]$ функции, а p и p' — любые два числа, оба превосходящие единицу и связанные соотношением $1/p + 1/p' = 1$. Тогда справедливо следующее неравенство:

$$\left|\int_a^b f(x)g(x)\,dx\right| \leqslant \left[\int_a^b |f(x)|^p\,dx\right]^{1/p} \left[\int_a^b |g(x)|^{p'}\,dx\right]^{1/p'}, \tag{10.36}$$

[1] Можно считать, что $M_i > 0$, ибо если $M_i = 0$, то $m_i = 0$, и неравенство (10.35) справедливо.

называемое *неравенством Гёльдера для интегралов*. Отметим, что существование интегралов в правой части неравенства (10.36) гарантируется теоремой 10.7, а интеграла в левой части — свойством 3° § 5.

Докажем сначала, что если $A(x)$ и $B(x)$ — две неотрицательные и интегрируемые на сегменте $[a, b]$ функции, удовлетворяющие неравенствам

$$\int_a^b A^p(x)\,dx \leqslant 1, \quad \int_a^b B^{p'}(x)\,dx \leqslant 1, \tag{10.37}$$

то

$$\int_a^b A(x)B(x)\,dx \leqslant 1. \tag{10.38}$$

В самом деле, в любой точке x сегмента $[a, b]$ справедливо неравенство (10.26)

$$A(x)B(x) \leqslant \frac{A^p(x)}{p} + \frac{B^{p'}(x)}{p'}.$$

Отсюда, в силу оценки 3° из § 6 и формул (10.37) следует, что

$$\int_a^b A(x)B(x)\,dx \leqslant \frac{1}{p}\int_a^b A^p(x)\,dx + \frac{1}{p'}\int_a^b B^{p'}(x)\,dx \leqslant \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = 1.$$

Неравенство (10.38) доказано.

Полагая

$$A(x) = \frac{|f(x)|}{\left[\int_a^b |f(x)|^p\,dx\right]^{1/p}}, \quad B(x) = \frac{|g(x)|}{\left[\int_a^b |g(x)|^{p'}\,dx\right]^{1/p'}},$$

мы придем к следующему неравенству:

$$\int_a^b |f(x)|\,|g(x)|\,dx \leqslant \left[\int_a^b |f(x)|^p\,dx\right]^{1/p} \left[\int_a^b |g(x)|^{p'}\,dx\right]^{1/p'}.$$

Так как, в силу замечания 2, п. 1 § 6,

$$\left|\int_a^b f(x)g(x)\,dx\right| \leqslant \int_a^b |f(x)|\,|g(x)|\,dx,$$

то неравенство Гёльдера (10.36) для интегралов установлено.

З а м е ч а н и е. В частном случае $p = p' = 2$ неравенство Гёльдера для интегралов переходит в следующее неравенство:

$$\left|\int_a^b f(x)g(x)\,dx\right| \leqslant \sqrt{\int_a^b |f(x)|^2\,dx}\sqrt{\int_a^b |g(x)|^2\,dx}, \tag{10.39}$$

называемое *неравенством Коши–Буняковского для интегралов*.

6. Неравенство Минковского для интегралов. Для любых неотрицательных и интегрируемых на сегменте $[a, b]$ функций $f(x)$ и $g(x)$ и для любого числа $p > 1$ справедливо следующее неравенство:

$$\left\{\int_a^b [f(x)+g(x)]^p\,dx\right\}^{1/p} \leqslant \left[\int_a^b f^p(x)\,dx\right]^{1/p} + \left[\int_a^b g^p(x)\,dx\right]^{1/p}, \quad (10.40)$$

называемое *неравенством Минковского для интегралов*. Для получения этого неравенства нужно исходить из формулы

$$\int_a^b [f(x)+g(x)]^p\,dx = \int_a^b f(x)[f(x)+g(x)]^{p-1}\,dx + \int_a^b g(x)[f(x)+g(x)]^{p-1}\,dx$$

и применить неравенство Гёльдера к интегралам, стоящим в правой части этой формулы. Детали рассуждений предоставляем читателю.

По индукции из неравенства (10.40) можно получить следующее неравенство для n функций $f_1(x)$, $f_2(x)$, ..., $f_n(x)$, неотрицательных и интегрируемых на сегменте $[a, b]$:

$$\left\{\int_a^b [f_1(x)+f_2(x)+\ldots+f_n(x)]^p\,dx\right\}^{1/p} \leqslant$$
$$\leqslant \left[\int_a^b f_1^p(x)\,dx\right]^{1/p} + \left[\int_a^b f_2^p(x)\,dx\right]^{1/p} + \ldots + \left[\int_a^b f_n^p(x)\,dx\right]^{1/p}.$$

ДОПОЛНЕНИЕ 2

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО УТВЕРЖДЕНИЯ ИЗ П. 4 § 6

Для удобства сформулируем еще раз утверждение из п. 4 § 6.

Если на сегменте $[a, b]$ функция $g(x)$ монотонна, а $f(x)$ интегрируема, то на этом сегменте существует такое число ξ, что

$$\int_a^b f(x)g(x)\,dx = g(a)\int_a^\xi f(x)\,dx + g(b)\int_\xi^b f(x)\,dx. \quad (10.16)\,[1]$$

Предварительно докажем следующее вспомогательное предложение.

Лемма Абеля[2]. *Пусть $v_1 \geqslant v_2 \geqslant \ldots \geqslant v_n \geqslant 0$ и $u_1, u_2, \ldots, u_n$ — любые числа. Если суммы $S_i = u_1 + u_2 + \ldots + u_i$ при любом i заключены между A и B, то сумма $v_1u_1 + v_2u_2 + \ldots + v_nu_n$ заключена между числами Av_1 и Bv_1.*

Доказательство. Имеем $u_1 = S_1$, $u_i = S_i - S_{i-1}$. Поэтому

$$v_1u_1 + v_2u_2 + \ldots + v_nu_n = v_1S_1 + v_2(S_2 - S_1) + \ldots + v_n(S_n - S_{n-1}) =$$
$$= S_1(v_1 - v_2) + S_2(v_2 - v_3) + \ldots + S_{n-1}(v_{n-1} - v_n) + S_nv_n.$$

[1] Для удобства мы сохраняем нумерацию приведенной формулы.

[2] Нильс Генрих Абель (1802–1829) — норвежский математик.

Так как $v_i \geqslant 0$ и $v_i - v_{i+1} \geqslant 0$, то, заменяя в последнем соотношении каждое S_i сначала на A, а потом на B, получим неравенства

$$A[(v_1 - v_2) + (v_2 - v_3) + \ldots + (v_{n-1} - v_n) + v_n] \leqslant v_1 u_1 + v_2 u_2 + \ldots + v_n u_n \leqslant \\ \leqslant B[(v_1 - v_2) + (v_2 - v_3) + \ldots + (v_{n-1} - v_n) + v_n].$$

Отсюда, замечая, что выражения в квадратных скобках равны v_1, получим

$$A v_1 \leqslant v_1 u_1 + v_2 u_2 + \ldots + v_n u_n \leqslant B v_1.$$

Лемма доказана.

Замечание. При доказательстве леммы Абеля мы использовали преобразование суммы $\sum\limits_{k=1}^{n} v_k u_k$, которое обычно называют *преобразованием Абеля*. Более полные сведения о преобразовании Абеля и важные применения этого преобразования можно найти в п. 2 § 5 гл. 13.

Доказательство утверждения из п. 4 § 6. Допустим, что функция $g(x)$ не возрастает на $[a, b]$ и неотрицательна на этом сегменте. Имеем, в силу интегрируемости $f(x)g(x)$ [1],

$$\int\limits_a^b f(x)g(x)\,dx = \lim_{\Delta\to 0} \sum_{i=1}^{n} f(x_{i-1})g(x_{i-1})\Delta x_i, \quad \text{где} \quad \Delta = \max \Delta x_i.$$

Пусть M_i и m_i — точные грани $f(x)$ на $[x_{i-1}, x_i]$. Тогда, поскольку $g(x)$ неотрицательна, справедливы неравенства

$$\sum_{i=1}^{n} m_i g(x_{i-1})\Delta x_i \leqslant \sum_{i=1}^{n} f(x_{i-1})g(x_{i-1})\Delta x_i \leqslant \sum_{i=1}^{n} M_i g(x_{i-1})\Delta x_i. \tag{10.41}$$

Так как $g(x)$ не возрастает на $[a, b]$, то разность

$$\sum_{i=1}^{n} M_i g(x_{i-1})\Delta x_i - \sum_{i=1}^{n} m_i g(x_{i-1})\Delta x_i = \sum_{i=1}^{n} (M_i - m_i) g(x_{i-1})\Delta x_i$$

не превышает числа $g(a) \sum\limits_{i=1}^{n} (M_i - m_i)\Delta x_i$. Поскольку функция $f(x)$ интегрируема, сумма $\sum\limits_{i=1}^{n} (M_i - m_i)\Delta x_i = \sum\limits_{i=1}^{n} \omega_i \Delta x_i$ стремится к нулю при $\Delta \to 0$. Отсюда и из неравенств (10.41) вытекает, что для *любых чисел* μ_i, удовлетворяющих неравенствам $m_i \leqslant \mu_i \leqslant M_i$, каждая из сумм

$$\sum_{i=1}^{n} m_i g(x_{i-1})\Delta x_i, \qquad \sum_{i=1}^{n} \mu_i g(x_{i-1})\Delta x_i, \qquad \sum_{i=1}^{n} M_i g(x_{i-1})\Delta x_i$$

имеет своим пределом при $\Delta \to 0$ интеграл $\int\limits_a^b f(x)g(x)\,dx$. Согласно формуле (10.12) числа μ_i, $m_i \leqslant \mu_i \leqslant M_i$, можно выбрать так, что $\int\limits_{x_{i-1}}^{x_i} f(x)\,dx = \mu_i \Delta x_i$. Так как функция $F(x) = \int\limits_a^x f(t)\,dt$ непрерывна на сегменте $[a, b]$

[1] См. свойство 3° § 5.

(см. замечание 3 п. 1 § 7), то числа $S_i = \sum\limits_{k=1}^{i} \mu_k \Delta x_k = \int\limits_a^{x_i} f(t)\,dt$ заключены между точной нижней гранью m и точной верхней гранью M функции $F(x)$ на сегменте $[a, b]$. Положим $v_1 = g(a)$, $v_2 = g(x_1)$, ..., $v_n = g(x_{n-1})$, $u_1 = \mu_1 \Delta x_1$, ..., $u_n = \mu_n \Delta x_n$. Так как $v_1 \geqslant v_2 \geqslant \ldots \geqslant v_n \geqslant 0$ и суммы $S_i = \sum\limits_{k=1}^{i} u_k$ заключены между m и M, то, в силу леммы Абеля, сумма $\sum\limits_{i=1}^{n} g(x_{i-1})\mu_i \Delta x_i$ заключена между $mg(a)$ и $Mg(a)$. Но тогда и предел при $\Delta \to 0$ этой суммы заключен между $mg(a)$ и $Mg(a)$, т. е. справедливы неравенства

$$g(a)m \leqslant \int\limits_a^b f(x)g(x)\,dx \leqslant g(a)M.$$

Непрерывная функция $F(x) = \int\limits_a^x f(t)\,dt$ принимает любое значение A, заключенное между ее точными гранями m и M, т. е. найдется такая точка ξ, что

$$F(\xi) = \int\limits_a^{\xi} f(t)\,dt = A = \frac{\int\limits_a^b f(x)g(x)\,dx}{g(a)}.$$

Поэтому

$$\int\limits_a^b f(x)g(x)\,dx = g(a)\int\limits_a^{\xi} f(x)\,dx. \tag{10.42}$$

Если невозрастающая функция $g(x)$ имеет и отрицательные значения, то функция $h(x) = g(x) - g(b)$ невозрастающая и имеет неотрицательные значения. Поэтому, в силу (10.42),

$$\int\limits_a^b f(x)[g(x) - g(b)]\,dx = [g(a) - g(b)]\int\limits_a^{\xi} f(x)\,dx.$$

Отсюда путем несложных преобразований мы и получим формулу (10.16).

Г Л А В А 11

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ОПРЕДЕЛЕННОГО ИНТЕГРАЛА

§ 1. Длина дуги кривой

1. Понятие плоской кривой. Наиболее естественно рассматривать кривую как след движущейся точки. В этом пункте мы придадим этому представлению о кривой математический смысл и введем понятие так называемой *простой кривой.*

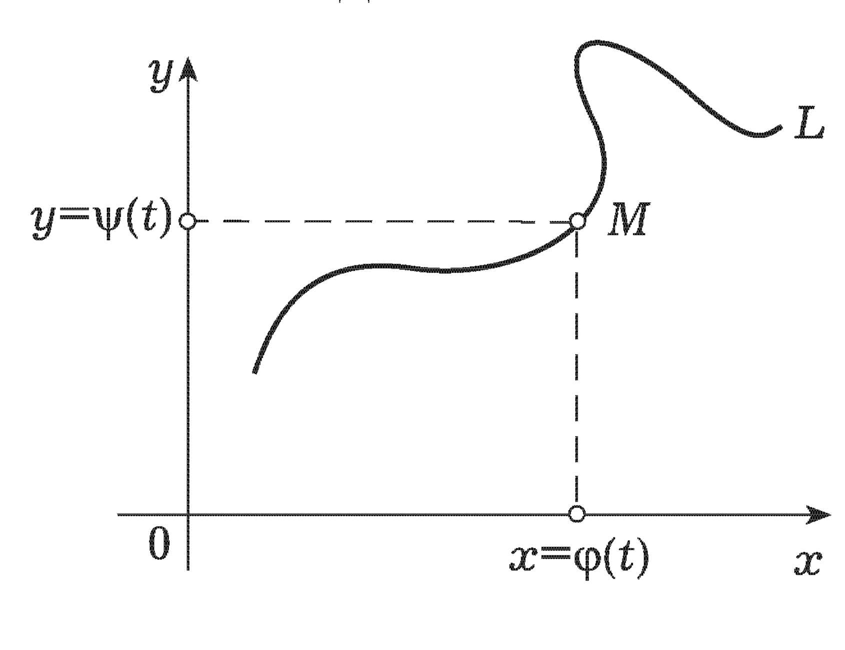


Рис. 11.1

Пусть функции $\varphi(t)$ и $\psi(t)$ непрерывны на сегменте $[\alpha, \beta]$ (аргумент этих функций в дальнейшем будем называть параметром). Если рассматривать параметр t как время, то указанные функции определяют закон движения точки M с координатами

$$x = \varphi(t), \qquad y = \psi(t), \qquad \alpha \leqslant t \leqslant \beta, \tag{11.1}$$

по плоскости (рис. 11.1) [1]. Множество $\{M\}$ точек M, отвечающих всевозможным значениям параметра t из сегмента $[\alpha, \beta]$ естественно рассматривать как *след* точки M, движущейся по закону (11.1). Отметим, что множество $\{M\}$, представляющее собой след движущейся точки, может не соответствовать нашим наглядным представлениям о кривой. Можно, например, ука-

[1] Здесь и в дальнейшем мы будем называть *плоскостью* совокупность всевозможных упорядоченных пар (x, y) чисел x и y (каждую такую пару мы будем называть точкой плоскости). Числа x и y называются координатами точки (x, y). Для краткости мы будем также обозначать точку (x, y) одной буквой M. Запись $M(x, y)$ означает, что точка M имеет координаты x и y.

зать такие непрерывные функции $\varphi(t)$ и $\psi(t)$, заданные на сегменте $[0,1]$, что след точки M, движущейся по закону $x=\varphi(t)$, $y=\psi(t)$, будет заполнять целый квадрат. Поэтому естественно выделить такие множества $\{M\}$, которые соответствуют нашим наглядным представлениям о кривой. Таким образом, мы приходим к понятию *простой кривой.*

Множество $\{M\}$ *всех точек* M, *координаты* x *и* y *которых определяются уравнениями* (11.1), *будем называть простой плоской кривой* L, *если различным значениям параметра* t *из сегмента* $[\alpha,\beta]$ *отвечают различные точки этого множества.*

Мы будем также употреблять следующую терминологию: «*уравнения* (11.1) *определяют простую плоскую кривую* L» и «*простая плоская кривая* L *параметризована при помощи уравнений* (11.1)».

Каждую точку множества $\{M\}$, фигурирующего в определении простой плоской кривой, мы будем называть точкой этой кривой, причем точки, отвечающие граничным значениям α и β параметра t, будем называть *граничными* точками простой кривой.

Примером простой кривой может служить график непрерывной на сегменте $[\alpha,\beta]$ функции $y=f(x)$. В самом деле, этот график можно рассматривать как след точки M, движущейся по закону $x=t$, $y=f(t)$, $\alpha\leqslant t\leqslant\beta$, причем, очевидно, различным значениям параметра t отвечают различные точки графика.

З а м е ч а н и е 1. Простые кривые не исчерпывают всех точечных множеств, заслуживающих наименования «кривая». Однако для наших целей достаточно понятия простой кривой.

З а м е ч а н и е 2. Одна и та же простая кривая L может быть параметризована различными способами. Мы будем рассматривать всевозможные параметризации простой кривой L, получающиеся из данной параметризации путем представления параметра t в виде непрерывных строго монотонных функций другого параметра s.

З а м е ч а н и е 3. Важным понятием является понятие *простой замкнутой кривой.* Такая кривая образуется следующим образом. Пусть L_1 и L_2 — две простые кривые, причем: 1) граничные точки кривой L_1 совпадают с граничными точками кривой L_2; 2) любые не граничные точки кривых L_1 и L_2 различны. Кривая L, полученная объединением кривых L_1 и L_2 и называется простой замкнутой кривой.

2. Параметрическое задание кривой. В математическом анализе и его приложениях удобно рассматривать кривые, задаваемые параметрически. Наглядными истоками такого способа задания кривой служит *представление о кривой как о геометрическом месте последовательных положений движу-*

щейся точки. Например, геометрическое место последовательных положений точки M с координатами x и y, движущейся по закону

$$x = a\frac{t^2-1}{t^2+1}, \qquad y = at\frac{t^2-1}{t^2+1}, \qquad -\infty < t < \infty, \tag{11.2}$$

представляет собой кривую, называемую *строфоидой* (рис. 11.2). Заметим, что движущаяся по строфоиде точка M попадает в одно и то же положение $x = 0$, $y = 0$ дважды при $t = -1$ и $t = 1$. Так как мы рассматриваем последовательные положения движущейся точки, то естественно считать различными точки строфоиды, отвечающие различным значениям параметра t.

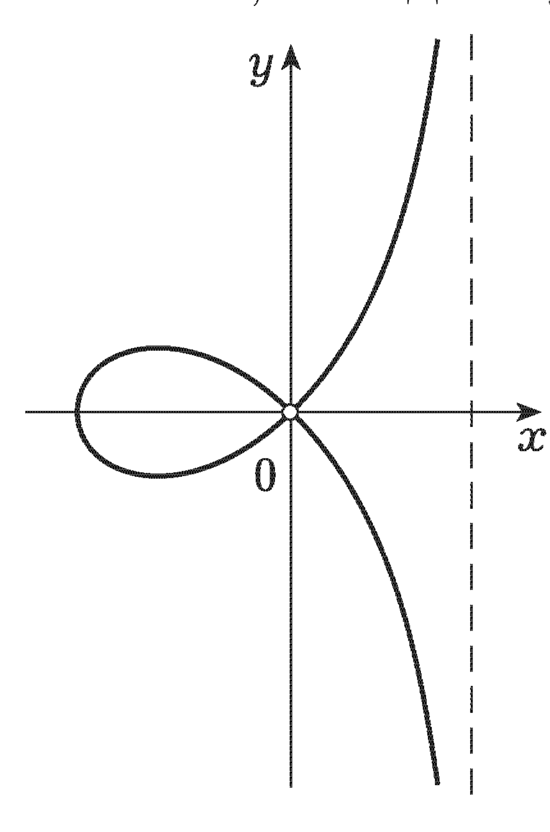


Рис. 11.2

Строфоида не является простой кривой. Нетрудно, однако, убедиться, что область изменения параметра t можно разбить на части таким образом, что соответствующие части строфоиды будут простыми кривыми. Именно, разобьем числовую прямую $-\infty < t < \infty$ на сегменты $[n-1, n]$, где n — любое целое число. Очевидно, если мы будем рассматривать параметр t на таком сегменте, то соответствующая часть строфоиды будет простой кривой.

Мы воспользуемся этой идеей разбиения на части для математического определения понятия кривой, задаваемой параметрически.

Будем считать, что множество $\{t\}$ представляет собой либо сегмент, либо полусегмент, либо интервал, либо числовую прямую, либо открытую или замкнутую полупрямую.

Введем понятие разбиения множества $\{t\}$. Будем говорить, что конечная или бесконечная система сегментов $\{[t_{i-1}, t_i]\}$ разбивает множество $\{t\}$, если: 1) объединение всех этих сегментов представляет собой все множество $\{t\}$ и 2) общими точками любых двух сегментов системы могут быть лишь их концы.

Рассмотрим примеры разбиений некоторых из указанных выше множеств $\{t\}$.

1. Система сегментов [0, 1/3], [1/3, 2/3], [2/3, 1], очевидно, разбивает сегмент $[0, 1]$.

2. Система сегментов [0, 1/2], [1/2, 3/4], [3/4, 7/8], ... $\ldots, \left[\frac{2^n-1}{2^n}, \frac{2^{n+1}-1}{2^{n+1}}\right], \ldots$ разбивает полусегмент $[0, 1)$.

3. Система сегментов $\{[n-1, n]\}$, где n — любое целое число, очевидно, разбивает всю числовую прямую.

Перейдем теперь к определению понятия кривой, задаваемой параметрически.

Пусть функции $\varphi(t)$ и $\psi(t)$ непрерывны на множестве $\{t\}$ [1]. Будем говорить, что *уравнения*

$$x = \varphi(t), \qquad y = \psi(t) \tag{11.3}$$

задают параметрически кривую L, если существует такая система сегментов $\{[t_{i-1}, t_i]\}$, разбивающих множество $\{t\}$, что для значений t из каждого данного сегмента этой системы уравнения (11.3) *определяют простую кривую.*

При этом *точки кривой L рассматриваются в определенном порядке в соответствии с возрастанием параметра t.* Именно, если точка M_1 соответствует значению параметра t_1, а точка M_2 — значению t_2, то M_1 считается предшествующей M_2, если $t_1 < t_2$. Отметим, что *точки, отвечающие различным значениям параметра, всегда считаются различными.*

Иными словами, кривую, задаваемую параметрически, можно рассматривать как объединение простых кривых, причем эти простые кривые последовательно пробегаются точкой M, координаты которой определяются соотношениями (11.3), когда параметр t монотонно пробегает множество $\{t\}$.

З а м е ч а н и е 1. Простую кривую можно рассматривать как кривую, заданную параметрически. В этом случае система сегментов, разбивающих сегмент $[\alpha, \beta]$, сводится к одному этому сегменту.

В качестве примера рассмотрим кривую L, задаваемую параметрически уравнениями

$$x = \cos t, \qquad y = \sin t, \tag{11.4}$$

где t изменяется на сегменте $[0, 4\pi]$. Очевидно, система сегментов $[0, \pi]$, $[\pi, 2\pi]$, $[2\pi, 3\pi]$, $[3\pi, 4\pi]$ разбивает сегмент $[0, 4\pi]$, причем для значений t из каждого указанного сегмента данной системы уравнения (11.4) определяют простую кривую (полуокружность). Наглядно ясно, что в рассматриваемом примере кривая L представляет собой дважды обходимую окружность.

З а м е ч а н и е 2. Рассмотренный пример и пример строфоиды показывают, что кривая, задаваемая параметрически, может иметь точки самопересечения и даже целые участки самоналегания.

З а м е ч а н и е 3. В случае кривой, задаваемой параметрически при помощи уравнений (11.3), мы будем также говорить о параметризации указанной кривой при помощи этих уравнений. Одна и та же кривая L может быть параметризована различными способами. Мы будем рассматривать все-

[1] Множество $\{t\}$ представляет собой одно из указанных выше множеств.

возможные параметризации кривой L, получающиеся из любой данной параметризации путем представления параметра t в виде непрерывных, строго возрастающих функций другого параметра s. Отметим, что лишь при таких преобразованиях параметра сохраняется порядок следования точек на кривой L.

3. Понятие пространственной кривой. Понятие пространственной кривой вводится в полной аналогии с понятием плоской кривой. Первоначально вводится понятие простой пространственной кривой как множества $\{M\}$ точек пространства, координаты x, y и z которых определяются уравнениями

$$x = \varphi(t), \qquad y = \psi(t), \qquad z = \chi(t), \qquad \alpha \leqslant t \leqslant \beta, \tag{11.5}$$

при условии непрерывности функций $\varphi(t)$, $\psi(t)$, $\chi(t)$ и условии несовпадения точек множества $\{M\}$, отвечающих различным значениям параметра t.

Понятие простой пространственной кривой и понятие разбиения множества $\{t\}$ изменения параметра, так же как и в плоском случае, приводят к понятию пространственной кривой, задаваемой параметрически уравнениями (11.5) при условии монотонного изменения параметра t на множестве $\{t\}$.

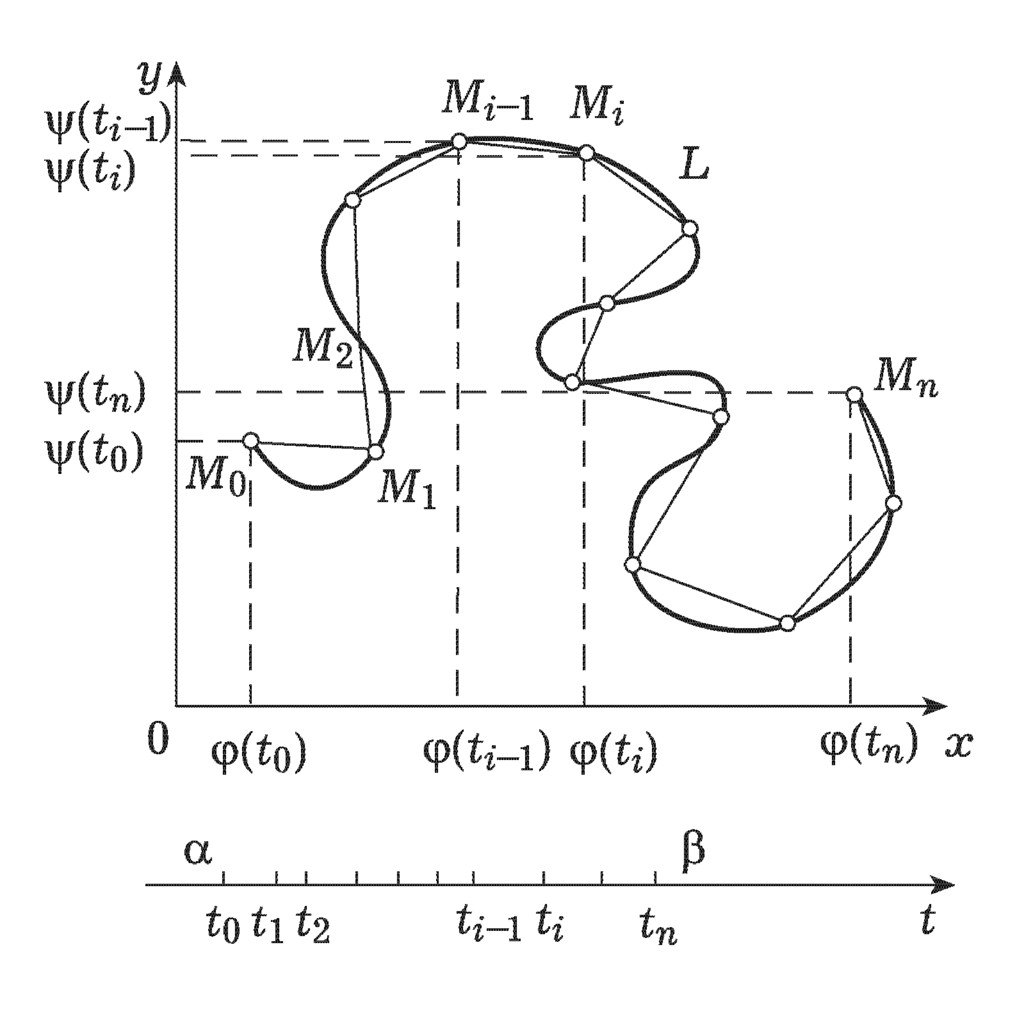


Рис. 11.3

Отметим, что вся терминология, введенная в предыдущих пунктах, естественным образом переносится на пространственные кривые.

4. Понятие длины дуги кривой. В этом пункте мы введем понятие длины дуги кривой, заданной параметрически.

Пусть кривая L задается параметрически уравнениями (11.3)

$$x = \varphi(t), \qquad y = \psi(t),$$

где параметр t изменяется на сегменте $[\alpha, \beta]$.

Пусть T — произвольное разбиение сегмента $[\alpha, \beta]$ точками $\alpha = t_0 < t_1 < t_2 < \ldots$ $\ldots < t_n = \beta$. Обозначим M_0, M_1, M_2, ... , M_n соответствующие точки кривой L (рис. 11.3). Возникающую при этом ломаную

$M_0M_1M_2\ldots M_n$ будем называть ломаной[1], вписанной в кривую L и отвечающей данному разбиению T сегмента $[\alpha,\beta]$. Так как длина $\bar{l}_i$ звена $M_{i-1}M_i$ этой ломаной равна

$$\sqrt{[\varphi(t_i)-\varphi(t_{i-1})]^2+[\psi(t_i)-\psi(t_{i-1}]^2}\quad {}^{2)},$$

то длина $\bar{l}(t_i)$ всей этой ломаной равна

$$\bar{l}(t_i)=\sum_{i=1}^{n}\bar{l}_i=\sum_{i=1}^{n}\sqrt{[\varphi(t_i)-\varphi(t_{i-1})]^2+[\psi(t_i)-\psi(t_{i-1})]^2}. \quad (11.6)$$

Определение. *Если множество $\{\bar{l}(t_i)\}$ длин вписанных в кривую L ломаных, отвечающих всевозможным разбиениям T сегмента $[\alpha,\beta]$, ограничено, то кривая L называется спрямляемой, а точная верхняя грань l множества $\{\bar{l}(t_i)\}$ называется длиной дуги кривой L.*

Замечание 1. Из определения кривой L, заданной параметрически, и определения длины дуги l такой кривой следует, что длина l положительна, $l>0$.

Замечание 2. Существуют неспрямляемые кривые. В дополнении к этой главе мы приведем пример плоской кривой, любая часть которой неспрямляема.

В дальнейшем мы будем часто пользоваться следующей леммой.

Лемма. *Пусть $\bar{l}^*(t_i)$ — длина ломаной, вписанной в кривую L и отвечающей разбиению T^* сегмента $[\alpha,\beta]$, а $\bar{l}(t_i)$ — длина ломаной, вписанной в кривую L и отвечающей разбиению T, полученному из разбиения T^* посредством добавления нескольких новых точек. Тогда $\bar{l}^*(t_i)\leqslant\bar{l}(t_i)$.*

Доказательство. Очевидно, достаточно рассмотреть случай, когда к разбиению T^* добавляется одна точка γ. Ломаная, отвечающая разбиению T, отличается от ломаной, отвечающей разбиению T^*, лишь тем, что одно звено $M_{i-1}M_i$ заменяется

[1] Будем называть *прямой* линию, определяемую параметрическими уравнениями $x=at+b$, $y=ct+d$. Постоянные a, b, c и d заведомо можно выбрать так, чтобы прямая проходила через две данные точки $M_1(x_1,y_1)$ и $M_2(x_2,y_2)$. Участок прямой между точками M_1 и M_2 естественно назвать *отрезком*, а совокупность конечного числа примыкающих друг к другу отрезков естественно назвать *ломаной*.

[2] Мы использовали формулу для расстояния между двумя точками M_{i-1} и M_i, координаты которых равны соответственно

$$x_{i-1}=\varphi(t_{i-1}),\quad y_{i-1}=\psi(t_{i-1})\quad \text{и}\quad x_i=\varphi(t_i),\quad y_i=\psi(t_i).$$

двумя звеньями $M_{i-1}C$ и CM_i (C — точка кривой, соответствующая значению γ параметра t). Так как длина стороны $M_{i-1}M_i$ треугольника $M_{i-1}CM_i$ не превосходит суммы длин двух других его сторон [1]) $M_{i-1}C$ и CM_i, то $\bar{l}^*(t_i) \leqslant \bar{l}(t_i)$.

Перечислим некоторые свойства спрямляемых кривых:

1°. *Если кривая L спрямляема, то длина l ее дуги не зависит от параметризации этой кривой.*

2°. *Если спрямляемая кривая L разбита при помощи конечного числа точек M_0, M_1, ..., M_n* [2]) *на конечное число кривых L_i, то каждая из этих кривых L_i спрямляема и сумма длин l_i всех кривых L_i равна длине l кривой L.*

3°. *Пусть кривая L задана параметрически уравнениями* (11.3). *Обозначим $l(t)$ длину дуги участка L_t кривой L, точки которого определяются всеми значениями параметра из сегмента $[\alpha, t]$. Функция $l(t)$ является возрастающей и непрерывной функцией параметра t.* Эту функцию $l = l(t)$ будем называть *переменной дугой* на кривой L.

4°. *Переменная дуга l может быть выбрана в качестве параметра.* Этот параметр называется *натуральным параметром.*

Справедливость свойства 4° непосредственно вытекает из свойства 3°. В самом деле, так как переменная дуга $l = l(t)$ является возрастающей и непрерывной функцией параметра t, то и параметр t может быть представлен в виде монотонной и непрерывной функции $t = f(l)$ переменной дуги l, и поэтому переменная дуга l может быть выбрана в качестве параметра.

Доказательство свойств 1°–3°.

1°. Пусть имеются две параметризации кривой L, а t и s – параметры этих параметризаций, определенные соответственно на сегментах $[\alpha, \beta]$ и $[a, b]$. Так как t представляет собой строго монотонную и непрерывную функцию от s, а s — строго монотонную и непрерывную функцию от t, то каждому разбиению T сегмента $[\alpha, \beta]$ соответствует определенное разбиение P сегмента $[a, b]$ и наоборот. Очевидно, что вписанные в L ломаные, отвечающие соответствующим разбиениям сегментов $[\alpha, \beta]$ и $[a, b]$, тождественны, и поэтому их длины $\bar{l}(t_i)$ и $\bar{l}(s_i)$ равны. Следовательно, множества $\{\bar{l}(t_i)\}$ и $\{\bar{l}(s_i)\}$ тождественны. Отсюда вытекает, что длина дуги кривой не зависит от параметризации этой кривой.

2°. Очевидно, свойство 2° достаточно доказать для случая, когда кривая L разбита точкой C на две кривые L_1 и L_2. Обозначим γ значение параметра t, которому отвечает точка C. Тогда точки кривой L_1 соответствуют значениям параметра t из сегмента $[\alpha, \gamma]$, а точки кривой L_2 соответствуют значениям параметра t из сегмента $[\gamma, \beta]$. Пусть T_1 и T_2 — произвольные разбиения указанных сегментов, а T — разбиение сегмента $[\alpha, \beta]$, получен-

---

[1]) Этот геометрический факт легко может быть доказан чисто аналитическим способом.

[2]) При этом точки $M_0, M_1, \ldots, M_n$ соответствуют значениям $t_0, t_1, \ldots, t_n$ параметра t, удовлетворяющим условиям $\alpha = t_0 < t_1 < \ldots < t_n = \beta$.

ное объединением разбиений T_1 и T_2. Если $\bar{l}_1(t_i)$, $\bar{l}_2(t_i)$ и $\bar{l}(t_i)$ — длины ломаных, вписанных в кривые L_1, L_2 и L и отвечающих разбиениям T_1, T_2 и T указанных выше сегментов, то очевидно

$$\bar{l}_1(t_i) + \bar{l}_2(t_i) = \bar{l}(t_i). \tag{11.7}$$

Поскольку числа $\bar{l}_1(t_i)$, $\bar{l}_2(t_i)$ и $\bar{l}(t_i)$ положительны, то из равенства (11.7) и спрямляемости кривой L следует, что множества $\{\bar{l}_1(t_i)\}$ и $\{\bar{l}_2(t_i)\}$ длин вписанных в кривые L_1 и L_2 ломаных, отвечающих всевозможным разбиениям сегментов $[\alpha, \gamma]$ и $[\gamma, \beta]$, ограничены, т. е. кривые L_1 и L_2 спрямляемы. Отметим, что из равенства (11.7) и из определения длины дуги кривой следует, что длины l_1, l_2 и l дуг кривых L_1, L_2 и L удовлетворяют неравенству [1])

$$l_1 + l_2 \leqslant l. \tag{11.8}$$

Предположим, что $l_1 + l_2 < l$. Тогда число

$$l - (l_1 + l_2) = \varepsilon \tag{11.9}$$

положительно. Из определения длины l дуги кривой L вытекает, что для положительного числа ε можно указать такое разбиение T^* сегмента $[\alpha, \beta]$, что длина $\bar{l}^*(t_i)$ ломаной, вписанной в кривую L и отвечающей этому разбиению, удовлетворяет неравенству $l - \bar{l}^*(t_i) < \varepsilon$. Добавим к разбиению T^* точку γ и обозначим полученное разбиение через T. Тогда, в силу леммы этого параграфа, длина $\bar{l}(t_i)$ ломаной, отвечающей разбиению T, удовлетворяет неравенству $l - \bar{l}(t_i) < \varepsilon$. Так как разбиение T сегмента $[\alpha, \beta]$ образовано объединением некоторых разбиений T_1 и T_2 сегментов $[\alpha, \gamma]$ и $[\gamma, \beta]$, то длины $\bar{l}_1(t_i)$ и $\bar{l}_2(t_i)$ ломаных, отвечающих этим разбиениям, удовлетворяют соотношению (11.7). Поэтому справедливо неравенство $l - [\bar{l}_1(t_i) + \bar{l}_2(t_i)] < < \varepsilon$. Так как $\bar{l}_1(t_i) + \bar{l}_2(t_i) \leqslant l_1 + l_2$, то тем более справедливо неравенство $l - (l_1 + l_2) < \varepsilon$. Но это неравенство противоречит равенству (11.9). Поэтому предположение, что $l_1 + l_2 < l$, неверно, а следовательно, в силу (11.8), $l_1 + l_2 = l$. Справедливость свойства 2° установлена.

3°. Из свойства 2° и замечания 1 этого пункта следует, что *переменная дуга $l = l(t)$ является строго возрастающей положительной функцией параметра t*. Для доказательства непрерывности функции $l(t)$ воспользуемся следующими утверждениями:

1) *Пусть ε — любое фиксированное положительное число, t — произвольная точка сегмента $[\alpha, \beta]$, а M — соответствующая точка кривой L. Существует такая ломаная, вписанная в кривую L, которая имеет точку M своей вершиной и длина которой отличается от длины кривой L меньше чем на $\varepsilon/2$.*

2) *Указанная ломаная может быть выбрана так, что длина каждого ее звена будет меньше $\varepsilon/2$.*

3) *Пусть ломаная выбрана так, как указано в утверждениях* 1) *и* 2). *Тогда часть кривой L, стягиваемая любым звеном рассматриваемой ломаной, имеет длину меньше ε.*

Убедимся, что из сформулированных утверждений и монотонности функции $l(t)$ вытекает ее непрерывность в любой фиксированной точке t

---

[1]) Из равенства (11.7) вытекает, что для любых разбиений T_1 и T_2 сегментов $[\alpha, \gamma]$ и $[\gamma, \beta]$ справедливо неравенство $\bar{l}_1(t_i) + \bar{l}_2(t_i) \leqslant l$. Отсюда и из определения точной верхней грани получим неравенство (11.8).

этого сегмента (в точках α и β функция $l(t)$ непрерывна соответственно справа и слева).

Нам нужно доказать, что для любого $\varepsilon > 0$ можно указать такое $\delta > 0$, что при $|\Delta t| < \delta$ выполняется неравенство $|l(t + \Delta t) - l(t)| < \varepsilon$.

Рассмотрим то разбиение T сегмента $[\alpha, \beta]$, которому отвечает ломаная, обладающая перечисленными в утверждениях 1) и 2) свойствами. Обозначим через δ минимальную из длин двух частичных сегментов $[t_{k-1}, t_k]$, $[t_k, t_{k+1}]$ разбиения T, примыкающих к точке $t = t_k$ сегмента $[\alpha, \beta]$. Пусть приращение Δt аргумента удовлетворяет условию $|\Delta t| < \delta$. Ради определенности будем считать, что $\Delta t > 0$. Так как $t < t + \Delta t < t + \delta \leqslant t_{k+1}$, то в силу строгого возрастания функции $l(t)$ справедливы неравенства

$$l(t) < l(t + \Delta t) < l(t + \delta) \leqslant l(t_{k+1}).$$

В силу утверждения 3 справедливо неравенство

$$l(t_{k+1}) - l(t) < \varepsilon.$$

Отсюда и из предыдущих неравенств вытекает, что при $0 < \Delta t < \delta$ справедливо неравенство

$$l(t + \Delta t) - l(t) < \varepsilon.$$

Случай $\Delta t < 0$ рассматривается аналогично.

Перейдем теперь к доказательству утверждений 1), 2) и 3).

Доказательство утверждения 1). Пусть ε — любое фиксированное положительное число. Так как длина $l(\beta)$ всей кривой L, определяемой параметрическими уравнениями (11.3), является точной верхней гранью длин вписанных в эту кривую ломаных, отвечающих всевозможным разбиениям сегмента $[\alpha, \beta]$, то для данного $\varepsilon > 0$ можно указать такое разбиение T^{**} сегмента $[\alpha, \beta]$, для которого длина соответствующей ломаной, вписанной в кривую L, отличается от $l(\beta)$ меньше чем на $\varepsilon/2$. Добавим к разбиению T^{**} точку t. В силу леммы этого параграфа и определения длины дуги длина ломаной, отвечающей полученному разбиению T^* сегмента $[\alpha, \beta]$, отличается от $l(\beta)$ меньше чем на $\varepsilon/2$, и эта ломаная имеет своей вершиной точку M кривой, которая соответствует точке t сегмента $[\alpha, \beta]$.

Доказательство утверждения 2). Так как непрерывные на сегменте $[\alpha, \beta]$ функции $\varphi(t)$ и $\psi(t)$ равномерно непрерывны на этом сегменте, то по заданному $\varepsilon > 0$ можно указать такое $\delta > 0$, что для любого разбиения T сегмента $[\alpha, \beta]$ с длинами частичных сегментов $[t_{i-1}, t_i]$, меньшими δ, выполняются неравенства $|\varphi(t_i) - \varphi(t_{i-1})| < \dfrac{\varepsilon}{2\sqrt{2}}$, $|\psi(t_i) - \psi(t_{i-1})| < \dfrac{\varepsilon}{2\sqrt{2}}$. Поскольку длина $\overline{l}_i$ звена ломаной, отвечающей данному разбиению, равна $\sqrt{[\varphi(t_i) - \varphi(t_{i-1})]^2 + [\psi(t_i) - \psi(t_{i-1})]^2}$, то, очевидно, $\overline{l}_i < \varepsilon/2$. Рассмотрим теперь любое фиксированное разбиение T' сегмента $[\alpha, \beta]$ с длинами частичных сегментов, меньшими δ, и добавим к нему точки разбиения T^* (см. доказательство утверждения 1). В результате мы получим разбиение T, которому отвечает ломаная, вписанная в кривую L и удовлетворяющая всем условиям утверждения 2).

Доказательство утверждения 3). Пусть ломаная $M_0 M_1 \ldots M_{k-1} M_k M_{k+1} \ldots M_n$ удовлетворяет условиям утверждений 1) и 2). Убедимся, что длина каждой части кривой L, стягиваемой любым звеном рассматриваемой ломаной, меньше ε. В самом деле, пусть l_k — длина части $M_{k-1} M_k$ кривой L, а $\overline{l}_k$ — длина звена $M_{k-1} M_k$ ломаной. Тогда, в

силу условий утверждения 1), выполняется неравенство $\sum\limits_{k=1}^{n}(l_k - \bar{l}_k) < \varepsilon/2$. Поскольку каждое слагаемое $l_k - \bar{l}_k$ последней суммы неотрицательно, то $(l_k - \bar{l}_k) < \varepsilon/2$. Отсюда и из неравенства $\bar{l}_k < \varepsilon/2$ и вытекает требуемое неравенство $l_k < \varepsilon$.

Понятие длины дуги пространственной кривой, заданной параметрическими уравнениями (11.5), вводится в полной аналогии с понятием длины дуги плоской кривой. Рассматриваются длины $l(t_i)$ ломаных, вписанных в кривую L, причем очевидно, что

$$l(t_i) = \sum_{i=1}^{n} \sqrt{[\varphi(t_i) - \varphi(t_{i-1})]^2 + [\psi(t_i) - \psi(t_{i-1})]^2 + [\chi(t_i) - \chi(t_{i-1})]^2}.$$

Пространственная кривая L, определяемая уравнениями (11.5), называется *спрямляемой*, если множество $\{l(t_i)\}$ длин ломаных, вписанных в эту кривую, ограничено. Точная верхняя грань l этого множества называется длиной дуги кривой L.

Отметим, что пространственные спрямляемые кривые обладают перечисленными в этом пункте свойствами 1°, 2°, 3° и 4°. Доказательство этих свойств проводится совершенно аналогично доказательству для плоских кривых.

5. Достаточные условия спрямляемости кривой. Формулы для вычисления длины дуги кривой.

Теорема 11.1. *Если функции $x = \varphi(t)$ и $y = \psi(t)$ имеют на сегменте $[\alpha, \beta]$ непрерывные производные, то кривая L, определяемая параметрическими уравнениями* (11.3), *спрямляема и длина l ее дуги может быть вычислена по формуле*

$$l = \int_{\alpha}^{\beta} \sqrt{\varphi'^2(t) + \psi'^2(t)}\, dt. \tag{11.10}$$

Д о к а з а т е л ь с т в о. Докажем сначала, что кривая L спрямляема. Для этого преобразуем выражение (11.6) длины $\bar{l}(t_i)$ ломаной, вписанной в кривую L и отвечающей произвольному разбиению T сегмента $[\alpha, \beta]$. Так как функции $\varphi(t)$ и $\psi(t)$ имеют на сегменте $[\alpha, \beta]$ производные, то, в силу формулы Лагранжа, $\varphi(t_i) - \varphi(t_{i-1}) = \varphi'(\tau_i)\Delta t_i$, где $t_{i-1} < \tau_i < t_i$, $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$, и $\psi(t_i) - \psi(t_{i-1}) = \psi'(\tau_i^*)\Delta t_i$, где $t_{i-1} < \tau_i^* < t_i$. Подставляя найденные выражения для $\varphi(t_i) - \varphi(t_{i-1})$ и $\psi(t_i) - \psi(t_{i-1})$ в правую часть выражения (11.6), получим

$$\bar{l}(t_i) = \sum_{i=1}^{n} \sqrt{\varphi'^2(\tau_i) + \psi'^2(\tau_i^*)}\Delta t_i. \tag{11.11}$$

По условию функции $\varphi(t)$ и $\psi(t)$ имеют на сегменте $[\alpha, \beta]$ непрерывные производные. Следовательно, эти производные ограни-

чены, и поэтому существует такое M, что для всех t из сегмента $[\alpha, \beta]$ справедливы неравенства $|\varphi'(t)| \leqslant M$ и $|\psi'(t)| \leqslant M$. Но тогда из формулы (11.11) вытекает, что

$$0 < l(t_i) \leqslant \sum_{i=1}^{n} \sqrt{M^2 + M^2}\Delta t_i = M\sqrt{2}\sum_{i=1}^{n} \Delta t_i = M\sqrt{2}(\beta - \alpha).$$

Таким образом, множество $\{l(t_i)\}$ длин вписанных в кривую L ломаных, отвечающих всевозможным разбиениям T сегмента $[\alpha, \beta]$, ограничено, т. е. *кривая L спрямляема*. Обозначим через l длину этой кривой. Докажем, что длина l кривой L может быть вычислена по формуле (11.10). Заметим, что правая часть формулы (11.11) похожа на интегральную сумму

$$I\{t_i, \tau_i\} = \sum_{i=1}^{n} \sqrt{\varphi'^2(\tau_i) + \psi'^2(\tau_i)}\Delta t_i \tag{11.12}$$

интегрируемой функции $\sqrt{\varphi'^2(t) + \psi'^2(t)}$, причем эта сумма $I\{t_i, \tau_i\}$ отвечает разбиению T сегмента $[\alpha, \beta]$ и данному выбору точек τ_i на частичных сегментах $[t_{i-1}, t_i]$ этого разбиения. *Докажем, что для любого положительного $\varepsilon > 0$ можно указать такое $\delta > 0$, что при $\Delta < \delta$ ($\Delta = \max \Delta t_i$) выполняется неравенство*

$$|\bar{l}(t_i) - I| < \varepsilon/2, \tag{11.13}$$

где $I = \int\limits_{\alpha}^{\beta} \sqrt{\varphi'^2(t) + \psi'^2(t)}\, dt$ — предел при $\Delta \to 0$ интегральных сумм (11.12). Иными словами, *докажем, что при достаточно «мелких» разбиениях T сегмента $[\alpha, \beta]$ длины $l(t_i)$ ломаных, вписанных в кривую L и отвечающих этим разбиениям, как угодно мало отличаются от интеграла I*, стоящего в правой части формулы (11.10). Отметим, во-первых, что

$$\left|\sqrt{\varphi'^2(\tau_i) + \psi'^2(\tau_i^*)} - \sqrt{\varphi'^2(\tau_i) + \psi'^2(\tau_i)}\right| \leqslant$$
$$\leqslant |\psi'(\tau_i^*) - \psi'(\tau_i)| \leqslant M_i - m_i \text{ [1]}, \tag{11.14}$$

---

[1] Для получения неравенств (11.14) мы воспользовались неравенством $|\sqrt{a^2 + b^{*2}} - \sqrt{a^2 + b^2}| \leqslant |b^* - b|$, где $a^2 = \varphi'^2(\tau_i)$, $b^{*2} = \psi'^2(\tau_i^*)$ и $b^2 = \psi'^2(\tau_i)$ и неравенством $|\psi'(\tau_i^*) - \psi'(\tau_i)| \leqslant M_i - m_i$. Второе из этих неравенств очевидно, так как разность любых значений функции не больше разности ее точных граней. Докажем первое из указанных неравенств. Имеем

$$|\sqrt{a^2 + b^{*2}} - \sqrt{a^2 + b^2}| = \frac{|b^{*2} - b^2|}{\sqrt{a^2 + b^{*2}} + \sqrt{a^2 + b^2}} \leqslant$$
$$\leqslant \frac{|b^* - b|\,|b^* + b|}{\sqrt{b^{*2}} + \sqrt{b^2}} \leqslant \frac{|b^* - b|(|b^*| + |b|)}{|b^*| + |b|} = |b^* - b|.$$

где M_i и m_i — точные грани функции $\psi'(t)$ на частичном сегменте $[t_{i-1}, t_i]$. В силу (11.11), (11.12) и (11.14) справедливы неравенства

$$|l(t_i) - I\{t_i, \tau_i\}| = \\ = \left|\sum_{i=1}^{n}\left(\sqrt{\varphi'^2(\tau_i) + \psi'^2(\tau_i^*)} - \sqrt{\varphi'^2(\tau_i) + \psi'^2(\tau_i)}\right)\Delta t_i\right| \leqslant \\ \leqslant \sum_{i=1}^{n}\left|\sqrt{\varphi'^2(\tau_i) + \psi'^2(\tau_i^*)} - \sqrt{\varphi'^2(\tau_i) + \psi'^2(\tau_i)}\right|\Delta t_i \leqslant \\ \leqslant \sum_{i=1}^{n}(M_i - m_i)\Delta t_i = S - s, \qquad (11.15)$$

где S и s — верхняя и нижняя суммы функции $\psi'(t)$ для разбиения сегмента $[\alpha, \beta]$. Так как функции $\sqrt{\varphi'^2(t) + \psi'^2(t)}$ и $\psi'(t)$ интегрируемы на сегменте $[\alpha, \beta]$ (это вытекает из непрерывности производных $\varphi'(t)$ и $\psi'(t)$ на сегменте $[\alpha, \beta]$), то из определения интегрируемости и из теоремы 10.1 (см. § 1 и § 3 гл. 10) вытекает, что для любого $\varepsilon > 0$ можно указать такое $\delta > 0$, что при $\Delta < \delta$ $(\Delta = \max \Delta t_i)$ выполняются неравенства

$$|I\{t_i, \tau_i\} - I| < \varepsilon/4 \ \text{ и } \ S - s < \varepsilon/4. \qquad (11.16)$$

Поэтому при $\Delta < \delta$, в силу (11.15) и (11.16), справедливы неравенства $|l(t_i) - I| = |\bar{l}(t_i) - I\{t_i, \tau_i\} + I\{t_i, \tau_i\} - I| \leqslant |l(t_i) - I\{t_i, \tau_i\}| + |I\{t_i, \tau_i\} - I| < \varepsilon/4 + \varepsilon/4 = \varepsilon/2$. Таким образом, справедливость неравенства (11.13) доказана.

Докажем теперь, что *среди всевозможных ломаных, длины* $\bar{l}(t_i)$ *которых удовлетворяют неравенству* (11.13), *имеются ломаные, длины которых отличаются от длины l дуги кривой L меньше чем на $\varepsilon/2$.*

Так как l — точная верхняя грань множества $\{\bar{l}(t_i)\}$ длин ломаных, вписанных в кривую L и отвечающих всевозможным разбиениям сегмента $[\alpha, \beta]$, то найдется такое разбиение T^* этого сегмента, что длина $l^*(t_i)$ соответствующей ломаной удовлетворяет неравенствам

$$0 \leqslant l - l^*(t_i) < \varepsilon/2. \qquad (11.17)$$

Разобьем теперь каждый из частичных сегментов $[t_{i-1}, t_i]$ разбиения T^* на столь мелкие части, чтобы максимальная длина Δ разбиения T сегмента $[\alpha, \beta]$, полученного объединением указанных разбиений, была меньше δ, $\Delta < \delta$. Очевидно, что длина

$\bar{l}(t_i)$ ломаной, отвечающей разбиению T, удовлетворяет неравенству (11.13). Так как вершины ломаной, отвечающей разбиению T^*, являются также вершинами ломаной, отвечающей разбиению T, то в силу леммы этого параграфа длина $l(t_i)$ удовлетворяет неравенствам $0 < l^*(t_i) \leqslant l(t_i) \leqslant l$, и поэтому в силу неравенства (11.17) выполняется неравенство

$$0 \leqslant l - l(t_i) < \varepsilon/2. \tag{11.18}$$

Итак, мы доказали, что среди ломаных, длины $l(t_i)$ которых удовлетворяют неравенству (11.13), имеются ломаные, длины $\bar{l}(t_i)$ которых удовлетворяют неравенству (11.18). Сопоставляя неравенства (11.13) и (11.18), получим следующее неравенство:

$$|l - I| < \varepsilon.$$

В силу произвольности ε отсюда вытекает, что $l = I$. Теорема доказана.

Замечание 1. *Если функции $\varphi(t)$ и $\psi(t)$ имеют на сегменте* $[\alpha, \beta]$ *ограниченные производные, то кривая L, определяемая уравнениями* (11.1), *спрямляема.* В самом деле, в процессе доказательства теоремы (11.1) мы установили, что при условии ограниченности производных функций $\varphi(t)$ и $\psi(t)$ длины $l(t_i)$ ломаных, вписанных в кривую L и отвечающих всевозможным разбиениям T сегмента $[\alpha, \beta]$, ограничены.

Замечание 2. *Формула* (11.10) *для вычисления длины дуги справедлива, если производные $\varphi'(t)$ и $\psi'(t)$ определены и интегрируемы на сегменте* $[\alpha, \beta]$. В самом деле, из интегрируемости этих производных следует их ограниченность и поэтому, в силу замечания 1, спрямляемость кривой L. Заметим далее, что для вывода неравенств (11.14), (11.15) и (11.16), а следовательно, и неравенства (11.13) достаточно лишь существования и интегрируемости производных $\varphi'(t)$ и $\psi'(t)$, так как отсюда, согласно дополнению 1 к гл. 10, вытекает интегрируемость функции $\sqrt{\varphi'^2(t) + \psi'^2(t)}$. Все остальные рассуждения такие же, как и в доказательстве теоремы 11.1.

Замечание 3. *Если кривая L является графиком функции $y = f(x)$, имеющей на сегменте $[a, b]$ непрерывную производную $f'(x)$, то кривая L спрямляема и длина l дуги L может быть найдена по формуле*

$$l = \int_a^b \sqrt{1 + f'^2(x)}\, dx. \tag{11.19}$$

Для доказательства заметим, что график рассматриваемой функции представляет собой кривую, определяемую параметрическими уравнениями $x = t$, $y = f(t)$, $a \leqslant t \leqslant b$ и при этом, очевидно, выполнены все условия теоремы 11.1. Поэтому, полагая в формуле (11.10) $\varphi(t) = t$, $\psi(t) = f(t)$ и заменяя переменную интегрирования t на x, мы получим формулу (11.19). Отметим

также, что если кривая L определяется полярным уравнением $r = r(\theta)$, $\theta_1 \leqslant \theta \leqslant \theta_2$ и функция $r(\theta)$ имеет на сегменте $[\theta_1, \theta_2]$ непрерывную производную, то кривая L спрямляема и длина l дуги L может быть найдена по формуле

$$l = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sqrt{r^2(\theta) + r'^2(\theta)}d\theta. \tag{11.20}$$

Для доказательства воспользуемся формулами перехода от полярных координат к декартовым

$$x = r(\theta)\cos\theta, \qquad y = r(\theta)\sin\theta.$$

Таким образом, мы видим, что кривая L определяется параметрическими уравнениями, причем функции $\varphi = r(\theta)\cos\theta$ и $\psi = r(\theta)\sin\theta$ удовлетворяют условиям теоремы 11.1. Подставляя в (11.10) указанные значения φ и ψ, мы получим формулу (11.20).

Сформулируем достаточные условия спрямляемости пространственной кривой.

Если функции $\varphi(t)$, $\psi(t)$ *и* $\chi(t)$ *имеют на сегменте* $[\alpha, \beta]$ *непрерывные производные, то кривая* L, *определяемая уравнениями* (11.5), *спрямляема и длина* l *ее дуги может быть найдена по формуле*

$$l = \int_{\alpha}^{\beta} \sqrt{\varphi'^2(t) + \psi'^2(t) + \chi'^2(t)}\,dt. \tag{11.21}$$

Доказательство аналогично доказательству теоремы 11.1.

Замечание 4. Если функции $\varphi(t)$, $\psi(t)$ и $\chi(t)$ имеют ограниченные на сегменте $[\alpha, \beta]$ производные, то кривая L, определяемая уравнениями (11.5), спрямляема. Если при этом производные указанных функций интегрируемы на сегменте $[\alpha, \beta]$, то длина l дуги кривой L может быть вычислена по формуле (11.21) (см. замечания 1 и 2).

6. Дифференциал дуги. Пусть функции $x = \varphi(t)$ и $y = \psi(t)$ имеют на сегменте $[\alpha, \beta]$ непрерывные производные. В этом случае, в силу теоремы 11.1, переменная дуга $l(t)$ представляется следующей формулой:

$$l(t) = \int_{\alpha}^{t} \sqrt{\varphi'^2(\tau) + \psi'^2(\tau)}\,d\tau. \tag{11.22}$$

Так как подынтегральная функция в правой части формулы (11.22) непрерывна, то функция $l(t)$ дифференцируема, причем

$$l'(t) = \sqrt{\varphi'^2(t) + \psi'^2(t)}$$

(см. п. 1 § 7 гл. 10). Возводя обе части последнего равенства в квадрат и умножая затем на dt^2, получим формулу

$$[l'(t)\,dt]^2 = [\varphi'(t)\,dt]^2 + [\psi'(t)\,dt]^2. \tag{11.23}$$

Поскольку $l'(t)\,dt = dl$, $\varphi'(t)\,dt = dx$, $\psi'(t)\,dt = dy$, то из (11.23) найдем

$$dl^2 = dx^2 + dy^2. \tag{11.24}$$

Из формулы (11.24), в частности, следует, что если за параметр выбрана переменная дуга l, т. е. $x = g(l)$ и $y = h(l)$, то

$$\left(\frac{dx}{dl}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dl}\right)^2 = 1. \tag{11.25}$$

Отметим, что при условии непрерывности производных функций $x = \varphi(t)$, $y = \psi(t)$ и $z = \chi(t)$ для дифференциала dl дуги пространственной кривой, определяемой параметрическими уравнениями (11.5), справедлива формула

$$dl^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2. \tag{11.26}$$

Из формулы (11.26) следует, что если за параметр выбрана переменная дуга l, то

$$\left(\frac{dx}{dl}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dl}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dl}\right)^2 = 1. \tag{11.27}$$

7. Примеры вычисления длины дуги. 1°. Длина дуги циклоиды [1] $x = a(t - \sin t)$, $y = a(1 - \cos t)$, $0 \leqslant t \leqslant 2\pi$. В рассматриваемом случае $\varphi' = a(1 - \cos t)$, $\psi' = a \sin t$. Поэтому по формуле (11.10)

$$l = \int_0^{2\pi} a\sqrt{(1-\cos t)^2 + \sin^2 t}\,dt = 2a\int_0^{2\pi} \sin\frac{t}{2}dt = -4a\cos\frac{t}{2}\Big|_0^{2\pi} = 8a.$$

2°. *Цепной линией* называется график функции $y = a\,\mathrm{ch}\,\frac{x}{a}$ [2]. Найдем длину участка цепной линии, отвечающего сегменту $[0, x]$. Имеем по формуле (11.19)

$$l(x) = \int_0^x \sqrt{1 + y'^2(\xi)}d\xi = \int_0^x \sqrt{1 + \mathrm{sh}^2\frac{\xi}{a}}d\xi = \int_0^x \mathrm{ch}\,\frac{\xi}{a}d\xi = a\,\mathrm{sh}\,\frac{x}{a}.$$

---

[1] *Циклоида* — плоская кривая, которую описывает точка окружности радиуса a, катящейся без скольжения по прямой линии.

[2] Наименование цепная линия связано с тем, что форму рассматриваемой кривой имеет тяжелая цепь, подвешенная за концы.

3°. Найдем переменную дугу эллипса $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$, $a > b$, отсчитываемую от точки $M_0(0, b)$. Рассмотрим параметрические уравнения эллипса $x = a\sin t$, $y = b\cos t$, $0 \leqslant t \leqslant 2\pi$. По формуле (11.22) имеем

$$l(t) = \int_0^t \sqrt{\varphi'^2(\tau) + \psi'^2(\tau)}d\tau = \int_0^t \sqrt{a^2\cos^2\tau + b^2\sin^2\tau}d\tau = \\ = a\int_0^t \sqrt{1 - e^2\sin^2\tau}\,d\tau = aE(e, t).$$

Число $e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$ называется эксцентриситетом эллипса. Неопределенный интеграл $\int \sqrt{1 - e^2\sin^2 t}\,dt$, обращающийся в нуль при $t = 0$, называется эллиптическим интегралом 2-го рода и обозначается $E(e, t)$ (см. § 11 гл. 7).

§ 2. Площадь плоской фигуры [1]

1. Понятие квадрируемости плоской фигуры. Площадь квадрируемой плоской фигуры. Понятие площади плоской фигуры, являющейся многоугольником [2], известно из курса элементарной математики. В этом пункте мы введем понятие площади *плоской фигуры* Q — части плоскости, ограниченной простой замкнутой кривой L [3]. При этом кривую L будем называть границей фигуры Q.

Мы будем говорить, что многоугольник *вписан* в фигуру Q, если каждая точка этого многоугольника принадлежит фигуре Q или ее границе. Если все точки плоской фигуры и ее границы принадлежат некоторому многоугольнику, то будем говорить, что указанный многоугольник *описан* вокруг фигуры Q.

Ясно, что площадь любого вписанного в фигуру Q многоугольника не больше площади любого описанного вокруг фигуры Q многоугольника.

Пусть $\{S_i\}$ — числовое множество площадей вписанных в плоскую фигуру Q многоугольников, а $\{S_d\}$ — числовое множе-

[1]) Во второй части настоящего курса читатель найдет широкое применение понятий площади плоской фигуры и произвольного множества точек плоскости.

[2]) *Многоугольником* мы будем называть часть плоскости, ограниченную простой замкнутой ломаной линией.

[3]) Отметим, что простая замкнутая плоская кривая L разделяет плоскость на две части — внутреннюю и внешнюю. Это утверждение было доказано французским математиком Жорданом (1838–1922).

ство площадей описанных вокруг фигуры Q многоугольников. Очевидно, множество $\{S_i\}$ ограничено сверху (площадью любого описанного вокруг фигуры Q многоугольника), а множество $\{S_d\}$ ограничено снизу (например, числом нуль). Обозначим через $\underline{P}$ точную верхнюю грань множества $\{S_i\}$, а через $\overline{P}$ — точную нижнюю грань множества $\{S_d\}$. *Числа $\underline{P}$ и $\overline{P}$ называются соответственно нижней площадью и верхней площадью фигуры Q.* Отметим, что нижняя площадь $\underline{P}$ фигуры Q не больше верхней площади $\overline{P}$ этой фигуры, т. е. $\underline{P} \leqslant \overline{P}$. В самом деле, предположим, что верно противоположное неравенство $\underline{P} > \overline{P}$. Тогда, полагая $\frac{\underline{P} - \overline{P}}{2} = \varepsilon > 0$ и учитывая определение точных граней, мы найдем такой вписанный в фигуру Q многоугольник, площадь S_i которого будет больше числа $\underline{P} - \varepsilon = \frac{\underline{P} + \overline{P}}{2}$, т. е. $\frac{\underline{P} + \overline{P}}{2} < S_i$, и такой описанный вокруг фигуры Q многоугольник, площадь S_d которого меньше числа $\overline{P} + \varepsilon = \frac{\underline{P} + \overline{P}}{2}$, т. е. $S_d < \frac{\underline{P} + \overline{P}}{2}$. Сопоставляя полученные два неравенства, найдем, что $S_d < S_i$, чего не может быть, так как площадь S_d любого описанного многоугольника *не меньше* площади S_i любого вписанного многоугольника.

Введем понятие квадрируемости плоской фигуры.

Определение. *Плоская фигура Q называется к в а д р и р у е м о й, если верхняя площадь $\overline{P}$ этой фигуры совпадает с ее нижней площадью $\underline{P}$. При этом число $P = \underline{P} = \overline{P}$ называется площадью фигуры Q.*

З а м е ч а н и е. В дополнении к этой главе будет приведен пример неквадрируемой фигуры.

Справедлива следующая теорема.

Теорема 11.2. *Для того чтобы плоская фигура Q была квадрируемой, необходимо и достаточно, чтобы для любого положительного числа ε можно было указать такой описанный вокруг фигуры Q многоугольник и такой вписанный в фигуру Q многоугольник, разность $S_d - S_i$ площадей которых была бы меньше ε, $S_d - S_i < \varepsilon$.*

Д о к а з а т е л ь с т в о. 1) Н е о б х о д и м о с т ь. Пусть фигура Q квадрируема, т. е. $\underline{P} = \overline{P} = P$. Так как $\underline{P}$ и $\overline{P}$ — точные верхняя и нижняя грани множеств $\{S_i\}$ и $\{S_d\}$, то для любого числа $\varepsilon > 0$ можно указать такой вписанный в фигуру Q многоугольник, площадь S_i которого отличается от $\underline{P} = P$ меньше чем на $\varepsilon/2$, т. е. $P - S_i < \varepsilon/2$. Для этого же $\varepsilon > 0$ можно

указать такой описанный многоугольник, площадь S_d которого отличается от $\overline{P} = P$ меньше чем на $\varepsilon/2$, т. е. $S_d - P < \varepsilon/2$. Складывая полученные неравенства, найдем, что $S_d - S_i < \varepsilon$.

2) Достаточность. Пусть S_d и S_i — площади многоугольников, для которых $S_d - S_i < \varepsilon$. Так как $S_i \leqslant \underline{P} \leqslant \overline{P} \leqslant S_d$, то $\overline{P} - \underline{P} < \varepsilon$. В силу произвольности ε отсюда вытекает, что $\underline{P} = \overline{P}$. Таким образом, фигура квадрируема. Теорема доказана.

Мы будем говорить, что *граница плоской фигуры Q имеет площадь, равную нулю*, если для любого положительного числа $\varepsilon > 0$ можно указать такой описанный вокруг фигуры Q многоугольник и такой вписанный в фигуру Q многоугольник, разность $S_d - S_i$ площадей которых меньше ε. Очевидно, теорему 11.2 можно также сформулировать следующим образом.

Для того чтобы плоская фигура Q была квадрируемой, необходимо и достаточно, чтобы ее граница имела площадь, равную нулю.

Замечание. Во всех приведенных нами рассуждениях вместо плоской фигуры можно рассматривать произвольное множество точек плоскости.

Установим *достаточный признак квадрируемости* плоской фигуры.

Теорема 11.3. *Если граница L плоской фигуры Q представляет собой спрямляемую кривую, то фигура Q квадрируема.*

Доказательство. Пусть l^* — длина кривой L. Будем считать, что кривая L параметризована с помощью натурального параметра l, $0 \leqslant l \leqslant l^*$, причем, поскольку кривая L замкнута, ее граничные точки, отвечающие значениям 0 и l^* параметра l, совпадают. Пусть ε — произвольное положительное число. Разобьем сегмент $[0, l^*]$ точками $0 = l_0 < l_1 < \ldots < l_n = l^*$ на n равных частей длины меньше $\varepsilon/9l^*$. Рассмотрим ломаную $M_0M_1 \ldots M_n$ $(M_0 = M_n)$, вписанную в кривую L и отвечающую указанному разбиению сегмента $[0, l^*]$. Точки $M_0, M_1, \ldots, M_n$ разбивают кривую L на части $L_1, L_2, \ldots, L_n$, длины которых равны $(l^*/n) < (\varepsilon/9l^*)$. Очевидно, длины звеньев $M_{i-1}M_i$ указанной выше ломаной $M_0M_1 \ldots M_n$ не больше l^*/n. Поместим каждое звено $M_{i-1}M_i$ внутрь квадрата со стороной $3l^*/n$ так, как это указано на рис. 11.4. Легко убедиться, что дуга L_i, стягиваемая звеном $M_{i-1}M_i$, располагается внутри этого квадрата,

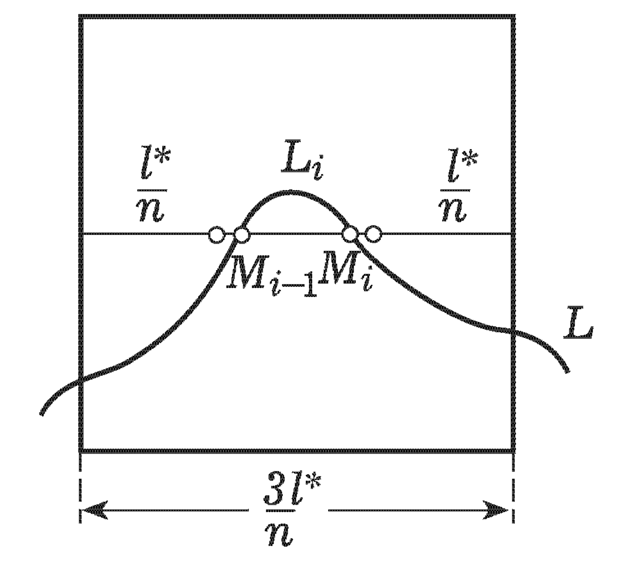


Рис. 11.4

ибо расстояние от любой точки, расположенной вне или на границе этого квадрата, до каждой из точек M_{i-1} и M_i не меньше l^*/n, и поэтому, если бы какая-либо точка M дуги L_i была вне или на границе указанного квадрата, то вписанная в эту дугу ломаная $M_{i-1}MM_i$ имела бы длину, не меньшую $2l^*/n$, т. е. большую, чем длина l^*/n дуги L_i, чего не может быть. Объединение всех таких квадратов, построенных на всех звеньях ло-

маной $M_0M_1\ldots M_n$, представляет собой многоугольную фигуру, содержащую кривую L, причем очевидно, что граница этой фигуры представляет собой объединение границ вписанного в фигуру Q многоугольника и описанного вокруг Q многоугольника. Очевидно также, что разность $S_d - S_i$ площадей этих многоугольников равна площади указанной фигуры, а площадь этой фигуры не превосходит суммы S площадей описанных выше квадратов. Так как $S = n\dfrac{9l^{*2}}{n^2} = 9l^*\dfrac{l^*}{n} < \varepsilon$ $\left(\text{последнее неравенство следует из того, что } \dfrac{l^*}{n} < \dfrac{\varepsilon}{9l^*}\right)$, то $S_d - S_i < \varepsilon$. Поэтому, согласно теореме 11.2, фигура Q квадрируема. Теорема доказана.

2. Площадь криволинейной трапеции. *Криволинейной трапецией* называется фигура, ограниченная графиком заданной на сегменте $[a, b]$ непрерывной и неотрицательной функции $f(x)$, ординатами, проведенными в точках a и b, и отрезком оси Ox между точками a и b (рис. 11.5). Докажем следующее утверждение.

Криволинейная трапеция представляет собой квадрируемую фигуру, площадь P которой может быть вычислена по формуле

$$P = \int_a^b f(x)\,dx. \tag{11.28}$$

Доказательство. Так как непрерывная на сегменте $[a, b]$ функция интегрируема, то для любого положительного числа ε можно указать такое разбиение T сегмента $[a, b]$, что разность $S - s < \varepsilon$, где S и s — соответственно верхняя и нижняя суммы разбиения T. Но S и s равны соответственно S_d и S_i, где S_d и S_i — площади ступенчатых фигур (многоугольников), первая из которых содержит криволинейную трапецию, а вторая содержится в криволинейной трапеции (на рис. 11.5 изображены также и указанные ступенчатые фигуры). Так как $S_d - S_i < \varepsilon$, то, в силу теоремы 11.2, криволинейная трапеция квадрируема. Поскольку предел при $\Delta \to 0$ верхних и нижних сумм равен $\int_a^b f(x)\,dx$ и $s \leqslant P \leqslant S$, то площадь P криволинейной трапеции может быть найдена по формуле (11.28).

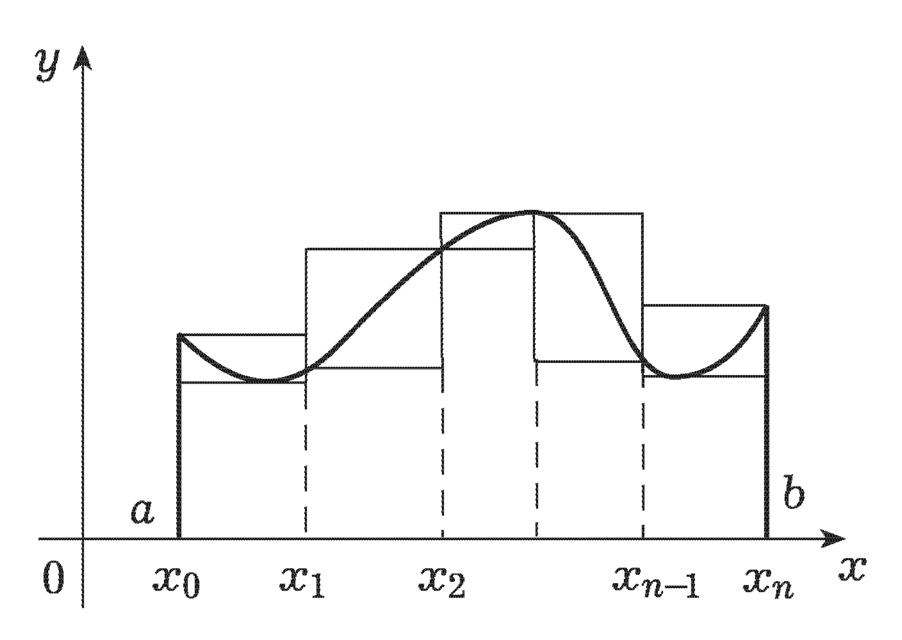


Рис. 11.5

З а м е ч а н и е. Если функция $f(x)$ непрерывна и неположительна на сегменте $[a,b]$, то значение интеграла $\int\limits_a^b f(x)\,dx$ равно взятой с отрицательным знаком площади криволинейной трапеции, ограниченной графиком функции $f(x)$, ординатами в точках a и b и отрезком оси Ox между точками a и b. Поэтому, если $f(x)$ меняет знак, то $\int\limits_a^b f(x)\,dx$ равен сумме взятых с определенным знаком площадей криволинейных трапеций, расположенных выше и ниже оси Ox, причем площади первых берутся со знаком $+$, а вторых — со знаком $-$.

3. Площадь криволинейного сектора. Пусть кривая L задана в полярной системе координат уравнением $r = r(\theta)$, $\alpha \leqslant \theta \leqslant \beta$ (рис. 11.6), причем функция $r(\theta)$ непрерывна и неотрицательна на сегменте $[\alpha,\beta]$. Плоскую фигуру, ограниченную кривой L и двумя лучами, составляющими с полярной осью углы α и β, мы будем называть *криволинейным сектором.*

Докажем следующее утверждение. *Криволинейный сектор представляет собой квадрируемую фигуру, площадь P которой может быть вычислена по формуле*

$$P = \frac{1}{2}\int\limits_\alpha^\beta r^2(\theta)\,d\theta. \qquad (11.29)$$

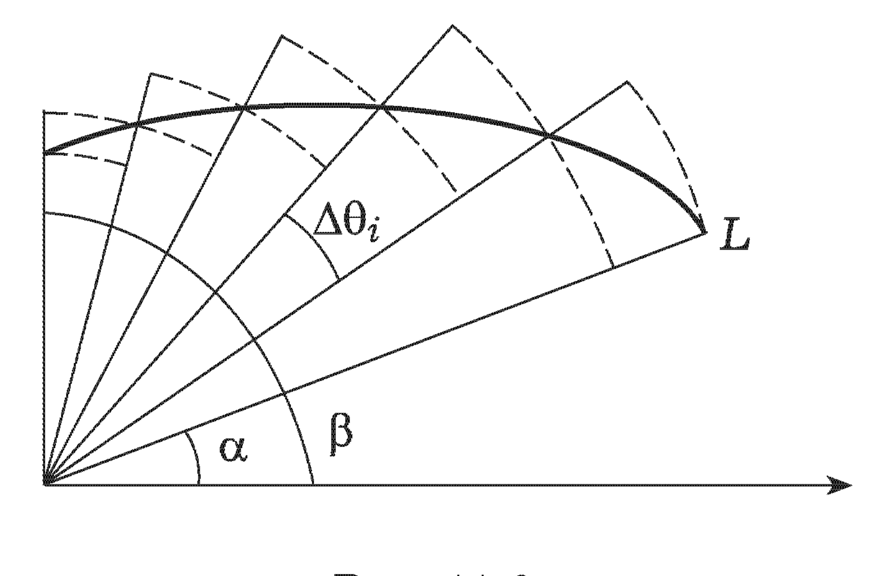


Рис. 11.6

Д о к а з а т е л ь с т в о. Рассмотрим разбиение T сегмента $[\alpha,\beta]$ точками $\alpha = \theta_0 < \theta_1 < \ldots < \theta_n = \beta$ и для каждого частичного сегмента $[\theta_{i-1},\theta_i]$ построим круговые секторы, радиусы которых равны минимальному r_i и максимальному R_i значениям $r(\theta)$ на сегменте $[\theta_{i-1},\theta_i]$. В результате получим две веерообразные фигуры, первая из которых содержится в криволинейном секторе, а вторая содержит криволинейный сектор (эти веерообразные фигуры изображены на рис. 11.6). Площади $\overline{S}_i$ и $\overline{S}_d$ указанных веерообразных фигур равны соответственно $\frac{1}{2}\sum\limits_{i=1}^{n} r_i^2\Delta\theta_i$ и $\frac{1}{2}\sum\limits_{i=1}^{n} R_i^2\Delta\theta_i$. Отметим, что первая из этих сумм является нижней суммой s для функции $\frac{1}{2}r^2(\theta)$ для указанного разбиения T сегмента $[\alpha,\beta]$, а вторая сумма является верхней суммой S для этой же функции и этого же разбиения. Так как функция $\frac{1}{2}r^2(\theta)$ интегрируема на сегменте $[\alpha,\beta]$, то разность

$S - s = \overline{S}_d - \overline{S}_i$ может быть как угодно малой. Например, для любого фиксированного $\varepsilon > 0$ эта разность может быть сделана меньше $\varepsilon/2$. Впишем теперь во внутреннюю веерообразную фигуру многоугольник Q_i с площадью S_i, для которого $\overline{S}_i - S_i < \frac{\varepsilon}{4}$, и опишем вокруг внешней веерообразной фигуры многоугольник Q_d площадью S_d, для которого $S_d - \overline{S}_d < \frac{\varepsilon}{4}$ [1]). Очевидно, первый из этих многоугольников вписан в криволинейный сектор, а второй описан вокруг него. Так как справедливы неравенства

$$S_i < \overline{S}_i \leqslant \frac{1}{2} \int\limits_{\alpha}^{\beta} r^2(\theta)\, d\theta < \overline{S}_d < S_d, \tag{11.30}$$

то, очевидно, $S_d - S_i < \varepsilon$. В силу произвольности ε, отсюда вытекает квадрируемость криволинейного сектора. Из неравенств (11.30) вытекает справедливость формулы (11.29).

4. Примеры вычисления площадей. 1°. Найти площадь P фигуры F, ограниченной графиками функций $y = x^\alpha$ и $x = y^\alpha$, $\alpha \geqslant 1$ (рис. 11.7). Поскольку фигура F симметрична относительно биссектрисы первого координатного угла, то ее площадь может быть получена посредством вычитания из 1 (площадь квадрата) удвоенной площади криволинейной трапеции, определяемой графиком функции $y = x^\alpha$ на сегменте $[0, 1]$. Таким образом, по формуле (11.28)

$$P = 1 - 2\int\limits_0^1 x^\alpha dx = 1 - 2\left[\frac{x^{\alpha+1}}{\alpha+1}\right]\Bigg|_0^1 = 1 - \frac{2}{\alpha+1} = \frac{\alpha-1}{\alpha+1}.$$

2°. Через три точки с координатами $(-h, y_0)$, $(0, y_1)$, (h, y_2) проходит только одна парабола $y = Ax^2 + Bx + D$ (или прямая, если эти точки лежат на одной прямой). Действительно, система уравнений относительно A, B, D [2])

$$\begin{aligned} Ah^2 - Bh + D &= y_0, \\ D &= y_1, \\ Ah^2 + Bh + D &= y_2 \end{aligned}$$

---

[1]) Рассматриваемые веерообразные фигуры состоят из круговых секторов. Каждый сектор квадрируем, и поэтому квадрируемы и веерообразные фигуры. Поэтому для этих фигур можно найти многоугольники, площади S_i и S_d которых удовлетворяют указанным неравенствам.

[2]) Эти уравнения представляют собой условия расположения точек $(-h, y_0)$, $(0, y_1)$ и (h, y_2) на параболе $y = Ax^2 + Bx + D$.

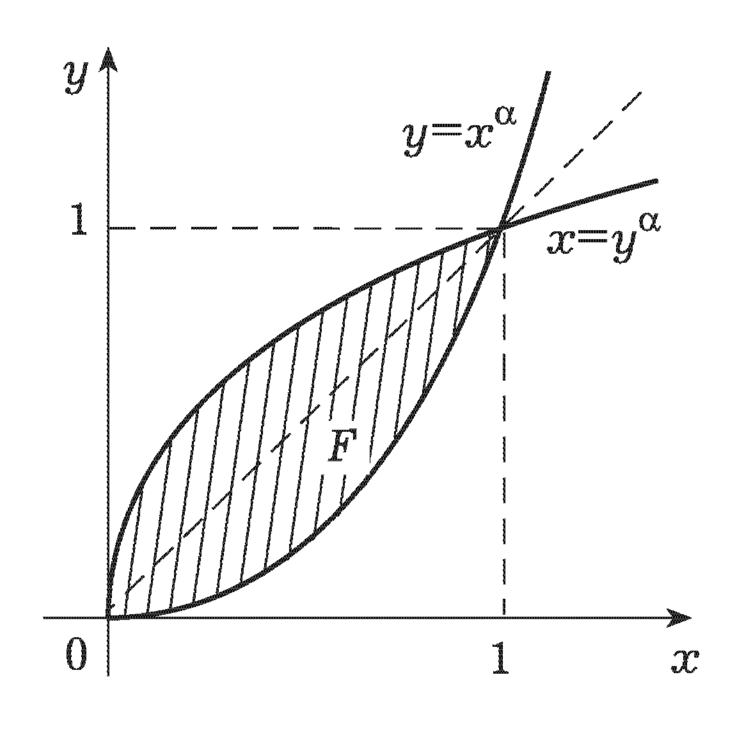


Рис. 11.7

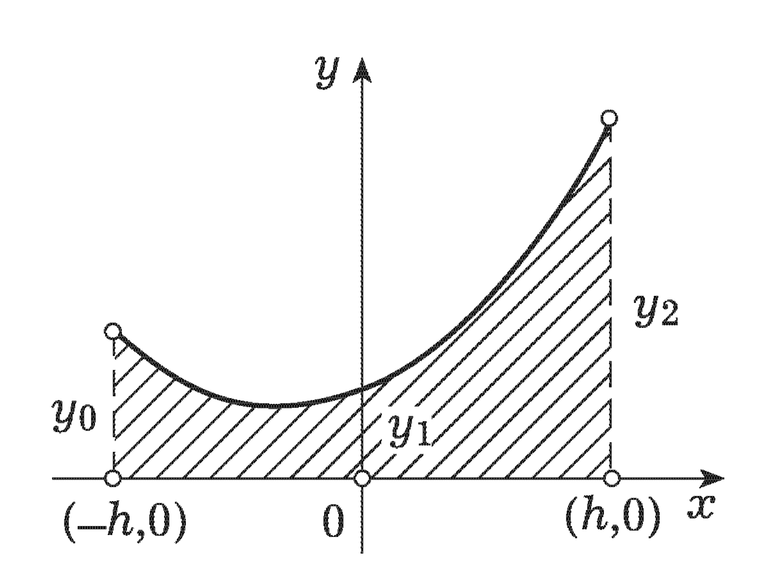


Рис. 11.8

имеет единственное решение. Именно:

$$A = \frac{y_0 - 2y_1 + y_2}{2h^2}, \quad B = \frac{y_2 - y_0}{2h}, \quad D = y_1.$$

Выразим площадь P криволинейной трапеции, определяемой указанной параболой, ординатами в точках $(-h, 0)$ и $(h, 0)$ и отрезком оси Ox между этими точками (рис. 11.8), через ординаты y_0, y_1 и y_2. Так как по формуле (11.28)

$$P = \int_{-h}^{h} (Ax^2 + Bx + D)\, dx = \left[\frac{Ax^3}{3} + \frac{Bx^2}{2} + Dx\right]\Bigg|_{-h}^{h} = \frac{2Ah^3}{3} + 2Dh,$$

то, учитывая выражения для A и D, найдем

$$P = \frac{h}{3}(y_0 + 4y_1 + y_2).$$

3°. Найти площадь P трилистника $r = a\cos 3\theta$ (рис. 11.9). Из чертежа ясно, что вся площадь трилистника равна увеличенной в шесть раз площади заштрихованной части трилистника, которая отвечает изменению θ от 0 до $\pi/6$. Поэтому по формуле (11.29)

$$P = 6\frac{a^2}{2}\int_0^{\pi/6} \cos^2 3\theta\, d\theta = \frac{\pi a^2}{4}.$$

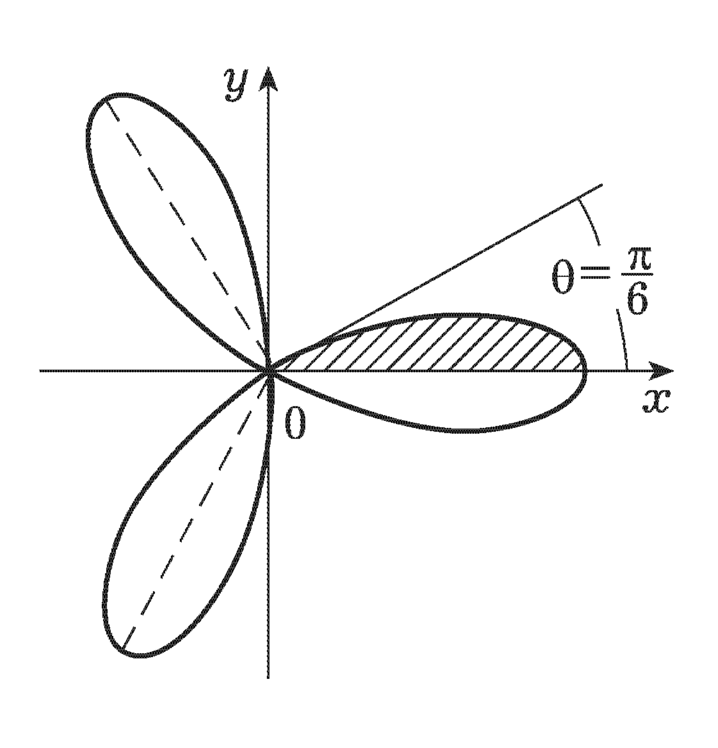


Рис. 11.9

§ 3. Объемы тел и площади поверхностей

1. Понятие кубируемости и объема. Пусть E — некоторое конечное тело [1]). Рассмотрим всевозможные многогранники, вписанные в тело E, и всевозможные многогранники, описанные вокруг тела E. Вычисление объема многогранника сводится к вычислению объемов тетраэдров (треугольных пирамид). Поэтому мы будем считать известным понятие объема многогранника.

Пусть $\{V_i\}$ — числовое множество объемов вписанных в тело E многогранников, а $\{V_d\}$ — числовое множество объемов описанных вокруг E многогранников. Множество $\{V_i\}$ ограничено сверху (объемом любого описанного многогранника), а множество $\{V_d\}$ ограничено снизу (например, числом нуль). Обозначим $\underline{V}$ точную верхнюю грань множества $\{V_i\}$, а $\overline{V}$ точную нижнюю грань множества $\{V_d\}$. Числа $\underline{V}$ и $\overline{V}$ называются соответственно *нижним* объемом и *верхним* объемом тела E.

Отметим, что нижний объем $\underline{V}$ тела E не больше верхнего объема $\overline{V}$ этого тела, т. е. $\underline{V} \leqslant \overline{V}$. Чтобы убедиться в справедливости этого, достаточно провести рассуждения, аналогичные тем, которые были сделаны для доказательства неравенства $\underline{P} \leqslant \overline{P}$ (см. п. 1 § 2).

Введем теперь понятие *кубируемости* тела.

Определение. *Тело E называется кубируемым, если верхний объем $\overline{V}$ этого тела совпадает с нижним объемом $\underline{V}$. При этом число $V = \underline{V} = \overline{V}$ называется объемом тела E.*

Справедлива следующая теорема.

Теорема 11.4. *Для того чтобы тело E было кубируемым, необходимо и достаточно, чтобы для любого положительного числа ε можно было указать такой описанный вокруг тела E многогранник и такой вписанный в тело E многогранник, разность $V_d - V_i$ объемов которых была бы меньше ε.* Доказательство этой теоремы вполне аналогично доказательству теоремы 11.2 (см. п. 1 § 2).

2. Кубируемость некоторых классов тел. Будем называть *цилиндром* тело, ограниченное цилиндрической поверхностью с образующими, параллельными некоторой оси, и двумя плоскостями, перпендикулярными этой оси. Эти плоскости в пересечении с цилиндрической поверхностью образуют плоские фигуры, называемые *основаниями* цилиндра, а расстояние h между основаниями цилиндра называется *высотой* цилиндра (рис. 11.10).

---

[1]) Телом мы будем называть часть пространства, ограниченную замкнутой непересекающейся поверхностью.

Докажем следующее утверждение. *Если основанием цилиндра E является квадрируемая фигура Q, то цилиндр представляет собой кубируемое тело, причем объем V цилиндра E равен Ph, где P — площадь основания Q, а h — высота цилиндра.*

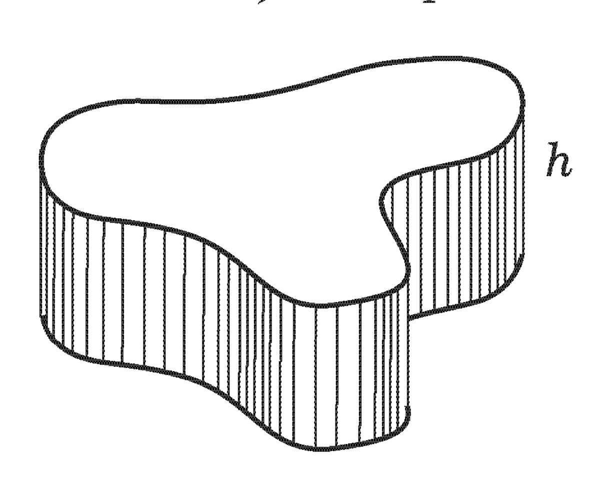


Рис. 11.10

Так как фигура Q квадрируема, то для любого положительного числа ε можно указать такие описанный и вписанный в эту фигуру многоугольники, разность $S_d - S_i$ площадей которых будет меньше ε/h. Объемы V_d и V_i призм с высотой h, основаниями которых служат указанные выше многоугольники, равны соответственно $S_d h$ и $S_i h$. Поэтому $V_d - V_i = (S_d - S_i)h < \frac{\varepsilon}{h} h = \varepsilon$. Так как эти призмы являются соответственно описанным и вписанным в рассматриваемое тело E многогранниками, то в силу теоремы 11.4 тело E кубируемо. Поскольку $V_i \leqslant Ph \leqslant V_d$, то объем цилиндра равен Ph.

Из доказанного утверждения вытекает *кубируемость ступенчатых тел* (ступенчатым телом называется объединение конечного числа цилиндров, расположенных так, что верхнее основание каждого предыдущего из этих цилиндров находится в одной плоскости с нижним основанием последующего цилиндра, см. рис. 11.11).

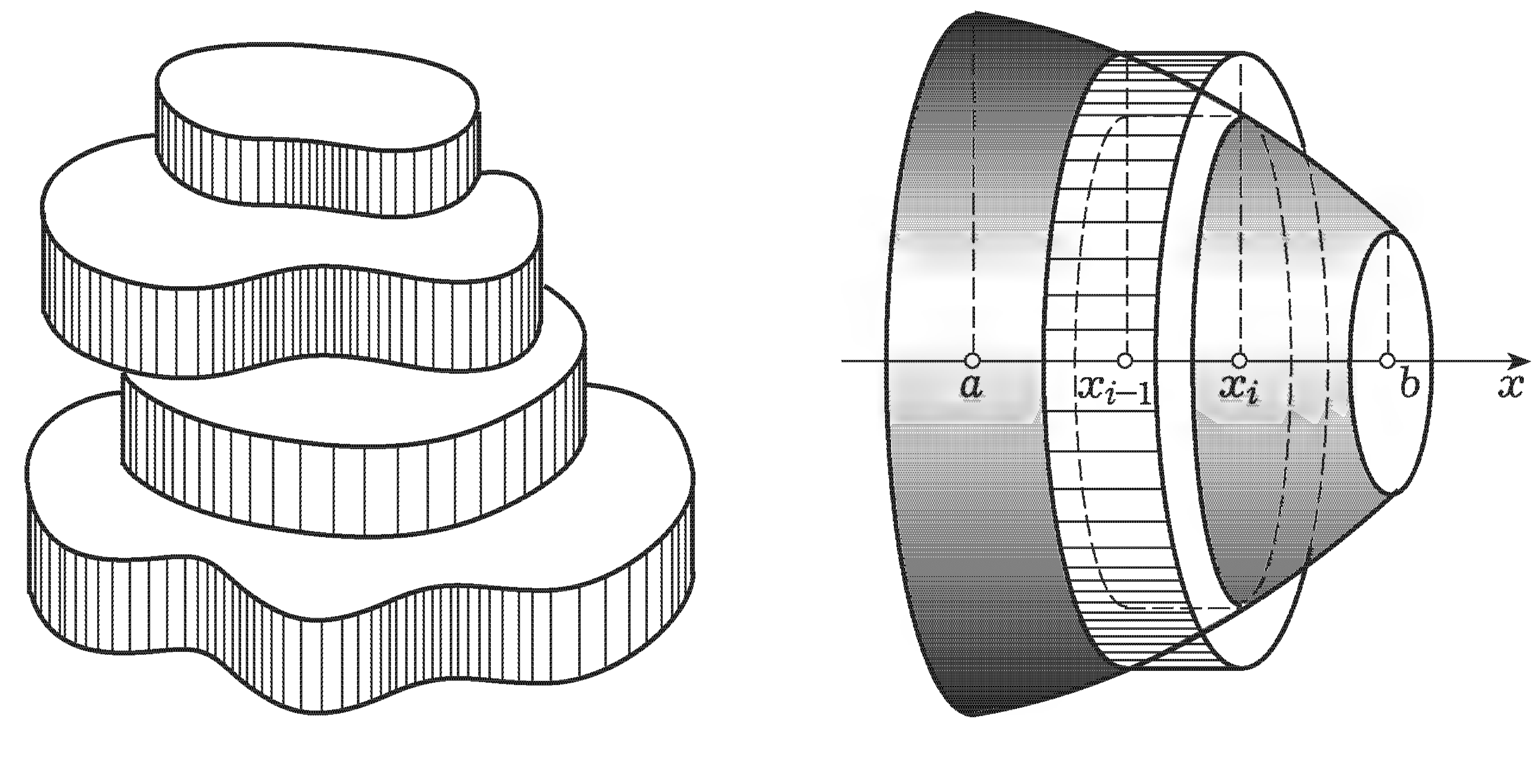


Рис. 11.11 Рис. 11.12

З а м е ч а н и е. Справедливо следующее очевидное утверждение. *Если для любого положительного числа ε можно указать такое описанное вокруг тела E ступенчатое тело и такое вписанное в E ступенчатое тело, разность $V_d - V_i$ объемов которых меньше ε, то тело E кубируемо.*

Используем это замечание для доказательства *кубируемости тела вращения* (рис. 11.12). Именно, докажем следующее утверждение.

Пусть функция $y = f(x)$ непрерывна на сегменте $[a, b]$. Тогда тело E, образованное вращением вокруг оси Ox криволинейной трапеции, ограниченной графиком функции $f(x)$, ординатами в точках a и b и отрезком оси Ox от a до b, кубируемо и его объем V может быть найден по формуле

$$V = \pi \int_a^b f^2(x)\,dx. \tag{11.31}$$

Доказательство. Пусть T — разбиение сегмента $[a, b]$ точками $a = x_0 < x_1 < \ldots < x_n = b$, m_i и M_i — точные грани $f(x)$ на сегменте $[x_{i-1}, x_i]$. На каждом таком сегменте построим два прямоугольника с высотами m_i и M_i (на рис. 11.12 изображены эти прямоугольники только на одном сегменте $[x_{i-1}, x_i]$). Мы получим две ступенчатые фигуры, одна из которых содержится в криволинейной трапеции, а другая содержит ее. При вращении криволинейной трапеции и этих ступенчатых фигур мы получим тело E и два ступенчатых тела, одно из которых содержится в E, а другое содержит E. Объемы V_i и V_d этих ступенчатых тел равны соответственно

$$\pi \sum_{i=1}^{n} m_i^2 \Delta x_i \quad \text{и} \quad \pi \sum_{i=1}^{n} M_i^2 \Delta x_i.$$

Очевидно, эти выражения представляют собой верхнюю и нижнюю суммы для функции $\pi f^2(x)$. Так как эта функция интегрируема, то разность указанных сумм для некоторого разбиения T сегмента $[a, b]$ будет меньше данного положительного числа ε. Следовательно, тело E кубируемо. Поскольку предел указанных сумм равен $\pi \int_a^b f^2(x)\,dx$, то объем V тела E может быть найден по формуле (11.31).

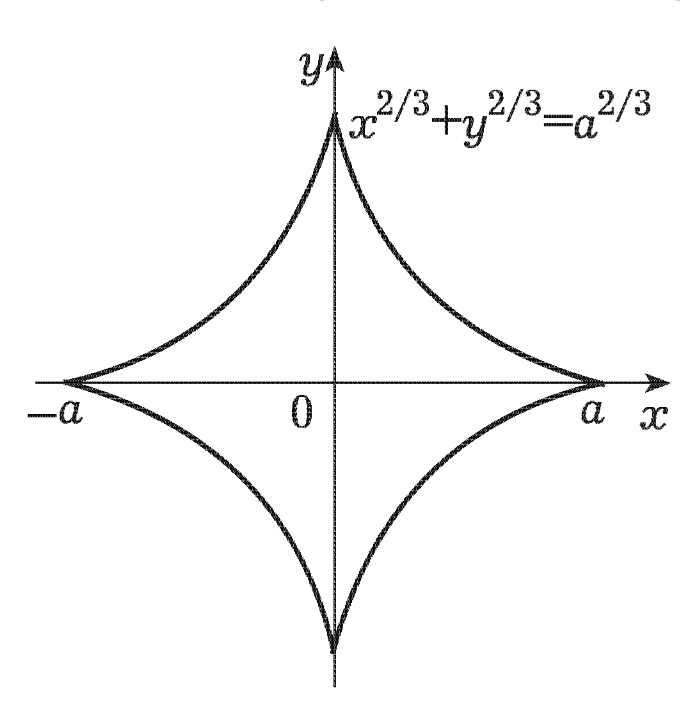


Рис. 11.13

3. Примеры вычисления объемов.

1°. Объем тела, полученного вращением вокруг оси Ox астроиды

$x^{2/3} + y^{2/3} = a^{2/3}$ (рис. 11.13). Так как $y = (a^{2/3} - x^{2/3})^{3/2}$, то

$$V = \pi \int_{-a}^{a} (a^{2/3} - x^{2/3})^3 dx = \frac{32}{105}\pi a^3.$$

2°. Объем тела, полученного вращением вокруг оси Ox синусоиды на сегменте $[0, \pi]$. Имеем

$$V = \pi \int_0^{\pi} \sin^2 x\, dx = \pi \int_0^{\pi} \frac{1 - \cos 2x}{2}\, dx = \frac{\pi^2}{2}.$$

4. Площадь поверхности вращения. Рассмотрим поверхность П, образованную вращением вокруг оси Ox графика функции $y = f(x)$, заданной на сегменте $[a, b]$ (рис. 11.14). Определим понятие *квадрируемости* поверхности вращения П. Пусть T — разбиение сегмента $[a, b]$ точками $a = x_0 < x_1 < \ldots < x_n = b$, и пусть $A_0, A_1, \ldots, A_n$ — соответствующие точки графика функции $f(x)$. Построим ломаную $A_0A_1\ldots A_n$. При вращении этой ломаной вокруг оси мы получим поверхность $\Pi(A_i)$, составленную из боковых поверхностей усеченных конусов. Обозначим через $P(x_i)$ площадь поверхности $\Pi(A_i)$. Если y_i — ординаты $f(x)$ в точках x_i, а l_i — длина звена $A_{i-1}A_i$ ломаной $A_0A_1\ldots A_n$, то

$$P(x_i) = 2\pi \sum_{i=1}^{n} \frac{y_{i-1} + y_i}{2}\, l_i = \pi \sum_{i=1}^{n} (y_{i-1} + y_i) l_i. \tag{11.32}$$

Сформулируем следующие определения.

1°. *Число P называется пределом площадей $P(x_i)$, если для любого данного положительного числа ε можно указать такое положительное число δ, что для любого разбиения T сегмента $[a, b]$, максимальная длина Δ частичных сегментов которого меньше δ, выполняется неравенство $|P(x_i) - P| < \varepsilon$.*

2°. *Поверхность вращения* П *называется квадрируемой, если существует предел P площадей $P(x_i)$. При этом число P называется площадью поверхности* П.

Докажем следующее утверждение.

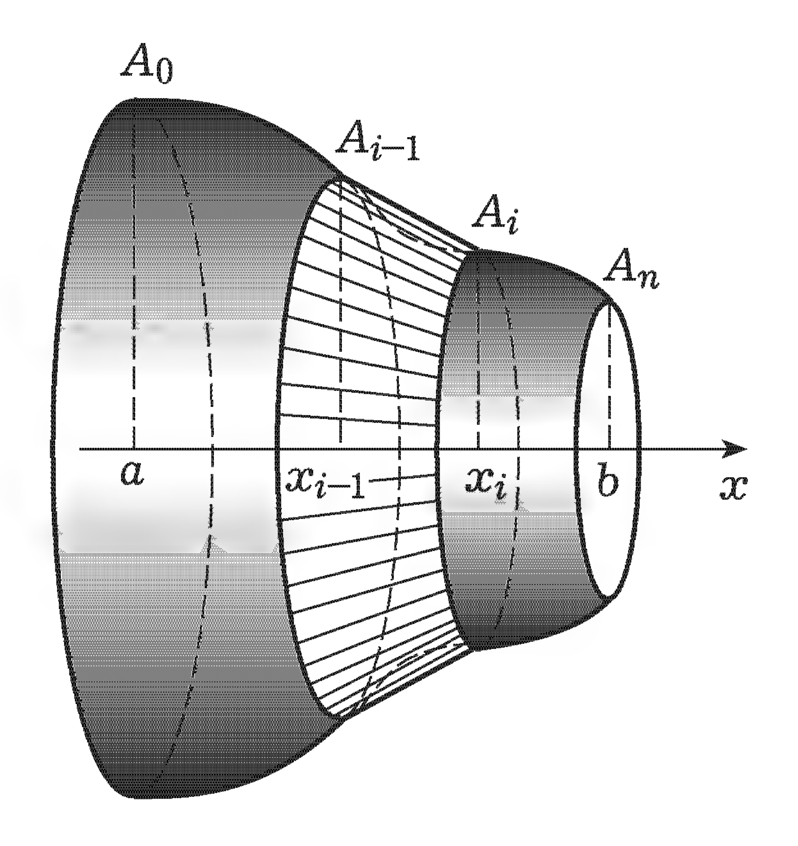


Рис. 11.14

Если на сегменте $[a, b]$ функция $f(x)$ имеет непрерывную производную $f'(x)$, то поверхность П, *образованная вращением графика этой функции вокруг оси Ox, квадрируема и ее площадь P может быть вычислена по формуле*

$$P = 2\pi \int_a^b f(x)\sqrt{1 + f'^2(x)}\, dx. \tag{11.33}$$

Д о к а з а т е л ь с т в о. Длина l_i звена $A_{i-1}A_i$ ломаной $A_0A_1 \ldots A_n$ равна $\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}$. По формуле Лагранжа имеем $y_i - y_{i-1} = f(x_i) - f(x_{i-1}) = f'(\xi_i)(x_i - x_{i-1})$. Полагая $x_i - x_{i-1} = \Delta x_i$, получим $l_i = \sqrt{1 + f'^2(\xi_i)}\Delta x_i$. Поэтому, согласно (11.32),

$$P(x_i) = 2\pi \sum_{i=1}^{n} f(\xi_i)\sqrt{1 + f'^2(\xi_i)}\Delta x_i +$$
$$+ \pi \left\{ \sum_{i=1}^{n} [(y_{i-1} - f(\xi_i)) + (y_i - f(\xi_i))]\sqrt{1 + f'^2(\xi_i)}\Delta x_i \right\}. \tag{11.34}$$

Первая сумма в правой части соотношения (11.34) представляет собой интегральную сумму функции $2\pi f(x)\sqrt{1 + f'^2(x)}$, которая, в силу условий утверждения, интегрируема и имеет предел $P = 2\pi \int\limits_a^b f(x)\sqrt{1 + f'^2(x)}\, dx$. Докажем, что выражение в фигурных скобках в правой части соотношения (11.34) имеет предел, равный нулю. В самом деле, пусть ε — любое положительное число. Так как функция $f(x)$ равномерно непрерывна на сегменте $[a, b]$, то по данному $\varepsilon > 0$ можно указать такое $\delta > 0$, что при $\Delta < \delta$ $(\Delta = \max \Delta x_i)$ выполняются неравенства $|y_{i-1} - f(\xi_i)| < \varepsilon$ и $|y_i - f(\xi_i)| < \varepsilon$. Если M — максимальное значение функции $\sqrt{1 + f'^2(x)}$ на сегменте $[a, b]$, то для выражения в фигурных скобках в правой части соотношения (11.34) получаем оценку

$$\left| \left\{ \sum_{i=1}^{n} [(y_{i-1} - f(\xi_i)) + (y_i - f(\xi_i))]\sqrt{1 + f'^2(\xi_i)}\Delta x_i \right\} \right| <$$
$$< 2M\varepsilon \sum_{i=1}^{n} \Delta x_i = 2M(b - a)\varepsilon.$$

В силу произвольности $\varepsilon > 0$ предел указанного выражения равен нулю. Итак, мы доказали существование предела P площа-

дей $P(x_i)$ и установили, что этот предел может быть вычислен по формуле (11.33). Утверждение доказано.

Замечание 1. Квадрируемость поверхности вращения можно доказать при более слабых условиях. Достаточно потребовать, чтобы функция $f'(x)$ была определена и интегрируема на сегменте $[a, b]$. Из этого предположения вытекает интегрируемость функции $f(x)\sqrt{1+f'^2(x)}$ (см. дополнение 1 к гл. 10). Дальнейшие рассуждения ничем не отличаются от рассуждений, проведенных при доказательстве утверждения этого пункта.

Замечание 2. Если поверхность П получается посредством вращения вокруг оси Ox кривой L, определяемой параметрическими уравнениями $x = \varphi(t)$, $y = \psi(t)$, $\alpha \leqslant t \leqslant \beta$, то осуществляя замену переменных под знаком определенного интеграла в формуле (11.33), получим следующее выражение для площади P этой поверхности

$$P = 2\pi \int_{\alpha}^{\beta} \psi(t)\sqrt{\varphi'^2(t) + \psi'^2(t)}\, dt. \tag{11.35}$$

Рассмотрим примеры вычисления площадей поверхностей вращения.

1°. Найдем площадь P поверхности эллипсоида вращения. Пусть эллипс $\dfrac{x^2}{a^2} + \dfrac{y^2}{b^2} = 1$ вращается вокруг оси Ox. Рассмотрим сначала случай $a > b$ (вращение вокруг большой оси эллипса). Так как в этом случае $f(x) = \dfrac{b}{a}\sqrt{a^2 - x^2}$, то, полагая $e = \sqrt{\dfrac{a^2 - b^2}{a^2}}$, найдем

$$P = 2\pi \int_{-a}^{a} f(x)\sqrt{1 + f'^2(x)}\, dx = 2\pi \frac{b}{a} \int_{-a}^{a} \sqrt{a^2 - e^2x^2}\, dx = 2\pi b\left(b + \frac{a}{e}\arcsin e\right).$$

Если $a < b$, то, полагая $e = \sqrt{\dfrac{b^2 - a^2}{b^2}}$ и проводя соответствующие вычисления, получим

$$P = 2\pi b\left(b + \frac{a^2}{2b}\frac{1}{e}\ln\frac{1+e}{1-e}\right).$$

2°. Найдем площадь P поверхности, образованной вращением вокруг оси Ox циклоиды, определяемой параметрическими уравнениями $x = a(t - \sin t)$, $y = a(1 - \cos t)$, $0 \leqslant t \leqslant 2\pi$. По формуле (11.35) имеем

$$P = 2\pi \int_{\alpha}^{\beta} \psi(t)\sqrt{\varphi'^2(t) + \psi'^2(t)}\, dt = 2\sqrt{2}\pi a^2 \int_{0}^{2\pi} (1 - \cos t)^{3/2}\, dt = \frac{64}{3}\pi a^2.$$

§ 4. Некоторые физические приложения определенного интеграла

1. Масса и центр тяжести неоднородного стержня. Рассмотрим неоднородный стержень, расположенный на сегмен-

те $[a,b]$ оси Ox. Пусть $\rho(x)$ — линейная плотность стержня[1]. Обозначим через T разбиение сегмента $[a,b]$ точками $a = x_0 < < x_1 < \ldots < x_n = b$. Выберем на каждом частичном сегменте $[x_{i-1}, x_i]$ точку ξ_i и составим сумму $\sum\limits_{i=1}^{n} \rho(\xi_i)\Delta x_i$. Так как каждое слагаемое этой суммы представляет собой приближенное значение массы части стержня на сегменте $[x_{i-1}, x_i]$, то указанную сумму естественно принять за приближенное значение массы всего стержня. Согласуясь с этими предварительными рассуждениями, мы *определим массу M всего стержня как предел сумм $\sum\limits_{i=1}^{n} \rho(\xi_i)\Delta x_i$ при стремлении к нулю $\Delta = \max \Delta x_i$, т. е. как интеграл $\int\limits_a^b \rho(x)\,dx$.* Таким образом,

$$M = \int\limits_a^b \rho(x)\,dx. \tag{11.36}$$

Для определения центра тяжести неоднородного стержня воспользуемся формулой для координаты центра тяжести системы $\{m_i(x_i)\}$ материальных точек, имеющих массы m_i и расположенных в точках x_i оси Ox. Именно, координата x_c центра тяжести системы $\{m_i\}$ может быть найдена по формуле

$$x_c = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + \ldots + m_nx_n}{m_1 + m_2 + \ldots + m_n} = \sum_{i=1}^{n} m_i x_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} m_i. \tag{11.37}$$

Рассмотрим разбиение T сегмента $[a,b]$ точками $a = x_0 < x_1 < \ldots \ldots < x_n = b$ и вычислим массу m_i части стержня, расположенной на сегменте $[x_{i-1}, x_i]$. Имеем по формуле (11.36) $m_i = = \int\limits_{x_{i-1}}^{x_i} \rho(x)\,dx$. Применяя формулу (10.13) среднего значения, получим также, что $m_i = \rho(\xi_i)\Delta x_i$. Считая, что масса m_i сосредоточена в точке ξ_i сегмента $[x_{i-1}, x_i]$, мы можем рассматривать неоднородный стержень как систему материальных точек с массами m_i, расположенных в точках ξ_i сегмента $[a,b]$. Поскольку

$$\sum_{i=1}^{n} m_i = \sum_{i=1}^{n} \int\limits_{x_{i-1}}^{x_i} \rho(x)\,dx = \int\limits_a^b \rho(x)\,dx = M,$$

[1] Если Δm — масса части стержня на сегменте $[x, x+\Delta x]$, то отношение $\Delta m/\Delta x$ называется *средней линейной плотностью* стержня на этом сегменте. Линейной плотностью $\rho(x)$ называется предел $\rho(x) = \lim\limits_{\Delta x \to 0} \dfrac{\Delta m}{\Delta x}$.

то по формуле (11.37) найдем приближенное выражение для координаты x_c центра тяжести неоднородного стержня

$$x_c \approx \frac{\sum_{i=1}^{n} \xi_i \rho(\xi_i) \Delta x_i}{M}. \tag{11.38}$$

Выражение, стоящее в числителе правой части соотношения (11.38), представляет собой интегральную сумму для функции $x\rho(x)$ на сегменте $[a, b]$. В соответствии с проведенными рассуждениями мы определим координату x_c центра тяжести неоднородного стержня по формуле

$$x_c = \frac{\int_a^b x\rho(x)\,dx}{\int_a^b \rho(x)\,dx}. \tag{11.39}$$

2. Работа переменной силы. Пусть материальная точка перемещается из точки a оси Ox в точку b этой оси под действием силы F, параллельной оси Ox. Будем считать, что эта сила является функцией от x, определенной на сегменте $[a, b]$. Пусть T — разбиение сегмента $[a, b]$ точками $a = x_0 < x_1 < \ldots < x_n = b$. Выберем на каждом частичном сегменте $[x_{i-1}, x_i]$ точку ξ_i и будем считать приближенным значением работы A переменной силы $F(x)$ на сегменте $[a, b]$ выражение $\sum_{i=1}^{n} F(\xi_i)\Delta x_i$. Согласуясь с этими предварительными рассуждениями, мы определим работу A переменной силы $F(x)$ на сегменте $[a, b]$ как интеграл $\int_a^b F(x)\,dx$. Таким образом,

$$A = \int_a^b F(x)\,dx. \tag{11.40}$$

ДОПОЛНЕНИЕ

ПРИМЕР НЕКВАДРИРУЕМОЙ ФИГУРЫ

1. Будем называть *полуоткрытым треугольником* множество точек треугольника, из границы [1]) которого удалены точки двух его сторон и двух вершин, прилегающих к этим сторонам. Рассмотрим построение кривой L, которая будет частью границы неквадрируемой фигуры Q. Это построение производится путем последовательных удалений определенных полуоткрытых треугольников из некоторого данного равнобедренного прямоугольного

[1]) Граница треугольника — множество точек его сторон и вершин.

треугольника T, который для удобства дальнейших рассуждений мы обозначим $T[0,1]$. Координаты вершин этого треугольника равны $(0,0)$, $(1,1)$, $(2,0)$ (рис. 11.15). Опишем теперь процесс последовательных удалений из треугольника $T[0,1]$ определенных полуоткрытых треугольников:

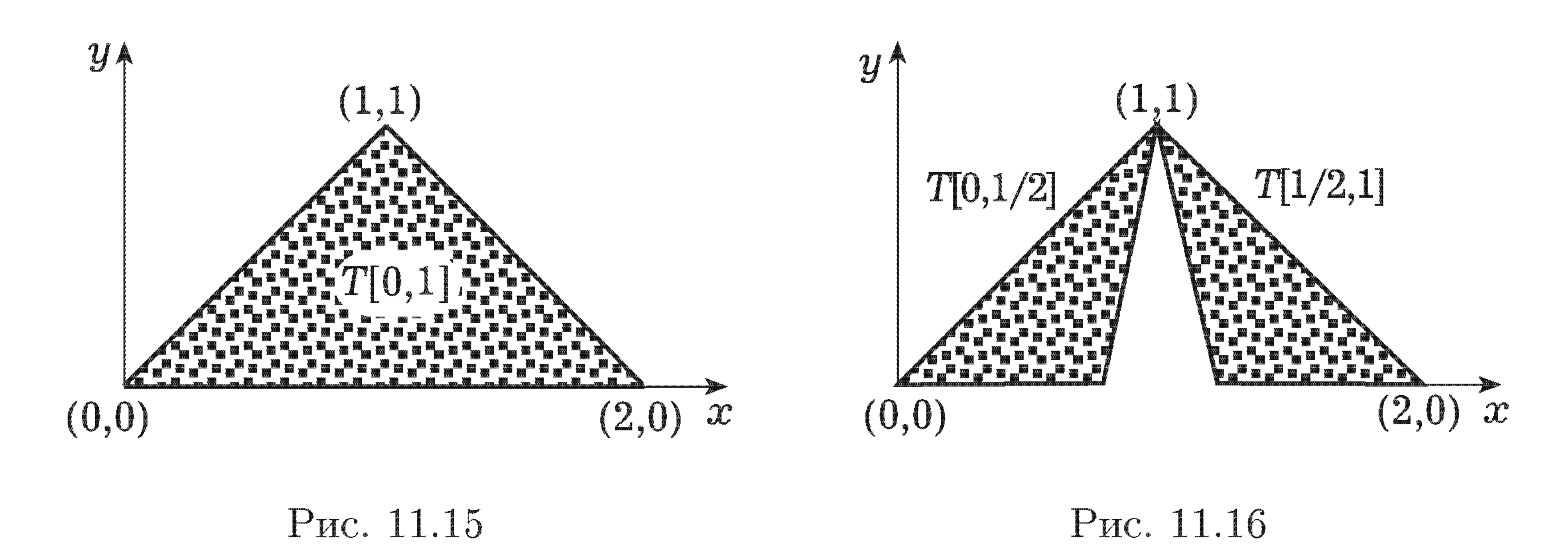


Рис. 11.15 Рис. 11.16

1. Удаляется полуоткрытый треугольник, одна вершина которого имеет координаты $(1,1)$, а две другие расположены на оси Ox. Площадь S_1 удаляемого треугольника равна $1/4$. Полученная в результате фигура изображена на рис. 11.16. Она состоит из двух треугольников $T[0,1/2]$ и $T[1/2,1]$, площади которых равны друг другу.

2. Из треугольников $T[0,1/2]$ и $T[1/2,1]$ удаляется по одному треугольнику, сумма S_2 площадей которых равна $1/8$. Полученная в результате фигура изображена на рис. 11.17. Она состоит из четырех треугольников: $T[0,1/4]$, $T[1/4,1/2]$, $T[1/2,3/4]$, $T[3/4,1]$, площади которых равны друг другу.

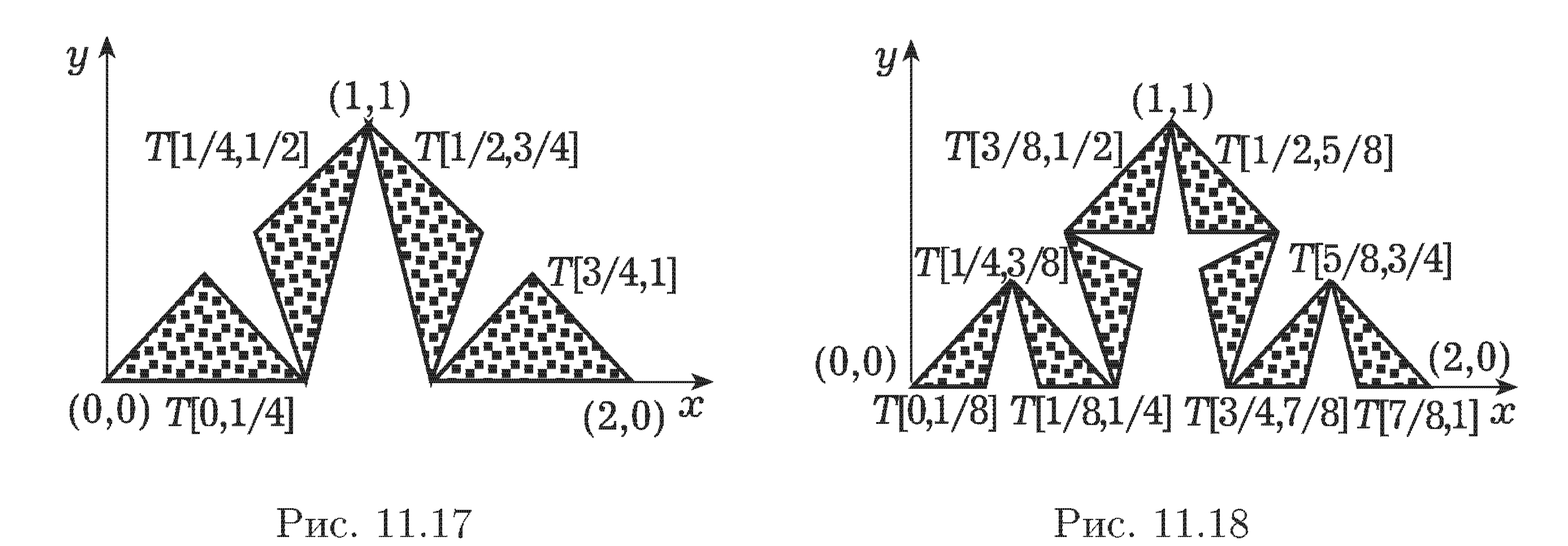


Рис. 11.17 Рис. 11.18

3. Из каждого указанного треугольника удаляется по одному треугольнику, сумма S_3 площадей которых равна $1/16$. Полученная в результате фигура изображена на рис. 11.18. Она состоит из восьми треугольников:

$$T[0,1/8],\ T[1/8,1/4],\ T[1/4,3/8],\ T[3/8,1/2],\ T[1/2,5/8],$$
$$T[5/8,3/4],\ T[3/4,7/8],\ T[7/8,1],$$

площади которых равны друг другу.

4. Из каждого указанного треугольника удаляется по одному треугольнику, сумма S_4 площадей которых равна $1/32$. Полученная в результате фи-

гура изображена на рис. 11.19. Она состоит из шестнадцати треугольников равной площади. Каждый из этих треугольников мы обозначим символом

$$T\left[\frac{p}{2^4}, \frac{p+1}{2^4}\right], \qquad p = 0, 1, \ldots, 15.$$

Дальнейший процесс удаления треугольников очевиден. Перейдем теперь к определению кривой L. Треугольники $T\left[\frac{p}{2^n}, \frac{p+1}{2^n}\right]$ (p и n — любые неотрицательные целые числа, удовлетворяющие условию $p < 2^n$), полученные в описанном выше процессе, обладают следующим свойством: пусть $T\left[\frac{p_1}{2^{n_1}}, \frac{p_1+1}{2^{n_1}}\right]$ и $T\left[\frac{p_2}{2^{n_2}}, \frac{p_2+1}{2^{n_2}}\right]$ — два треугольника таких, что $\frac{p_1}{2^{n_1}} \leqslant \frac{p_2}{2^{n_2}} < \frac{p_2+1}{2^{n_2}} \leqslant \frac{p_1+1}{2^{n_1}}$. Тогда второй из этих треугольников содержится в первом. Отметим также следующее очевидное свойство треугольников $T\left[\frac{p}{2^n}, \frac{p+1}{2^n}\right]$: при $n \to \infty$ их диаметры [1]) стремятся к нулю. Пусть $\left\{T\left[\frac{p_k}{2^{n_k}}, \frac{p_k+1}{2^{n_k}}\right]\right\}$, $k = 1, 2, \ldots,$ — *стягивающаяся система треугольников* (это означает, что треугольник, отвечающий индексу k, содержит треугольник, отвечающий индексу $k+1$, и при $k \to \infty$ диаметры треугольников стремятся к нулю). Каждая такая стягивающаяся *система треугольников имеет ровно одну общую точку* [2]). Рассмотрим всевозможные стягивающиеся системы указанных выше треугольников. *Кривую L мы определим как множество $\{M\}$ всевозможных точек, каждая из которых представляет собой общую точку некоторой стягивающейся системы указанных выше треугольников* $T\left[\frac{p}{2^n}, \frac{p+1}{2^n}\right]$.

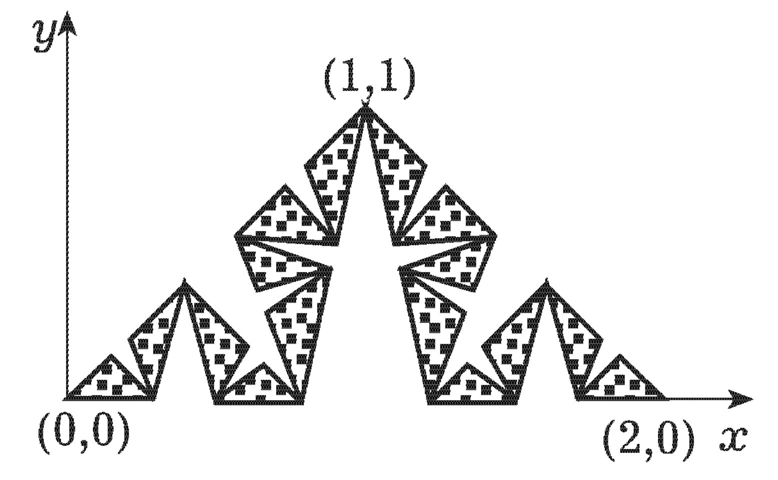


Рис. 11.19

Отметим, что множеству $\{M\}$ (кривой L) принадлежат вершины всех треугольников $T\left[\frac{p}{2^n}, \frac{p+1}{2^n}\right]$. Чтобы убедиться в этом, заметим, что вершина каждого такого треугольника принадлежит стягивающейся системе треугольников $\left\{T\left[\frac{2^k p}{2^{n+k}}, \frac{2^k p+1}{2^{n+k}}\right]\right\}$ и системе $\left\{T\left[\frac{2^k p-1}{2^{n+k}}, \frac{2^k p}{2^{n+k}}\right]\right\}$. Чтобы убедиться, что построенное нами множество $\{M\}$ является простой кривой в смысле определения, данного в п. 1 § 1 этой главы, мы должны доказать,

---

[1]) *Диаметром* треугольника называется длина его максимальной стороны.

[2]) В гл. 3 (см. п. 2 § 3) мы доказали, что стягивающаяся система сегментов имеет ровно одну общую точку. Проецируя стягивающуюся систему треугольников на оси Ox и Oy, мы получим стягивающиеся системы сегментов на координатных осях. Пусть x и y — соответственно общие точки указанных стягивающихся систем сегментов на осях Ox и Oy. Читатель легко убедится, что точка M с координатами x и y является единственной общей точкой рассматриваемой стягивающейся системы треугольников.

что все точки множества M определяются параметрическими уравнениями $x = \varphi(t)$, $y = \psi(t)$, $a \leqslant t \leqslant b$, где $\varphi(t)$ и $\psi(t)$ — непрерывные функции [1]).

Рассмотрим сегмент $[0, 1]$ оси t. Каждому сегменту $\left[\frac{p}{2^n}, \frac{p+1}{2^n}\right]$, где p и n — любые неотрицательные целые числа, $p < 2^n$, поставим в соответствие треугольник $T\left[\frac{p}{2^n}, \frac{p+1}{2^n}\right]$ [2]). На рис. 11.20 изображены сегменты, которым отвечают треугольники $T\left[\frac{p}{2^3}, \frac{p+1}{2^3}\right]$. Любая точка t сегмента $[0, 1]$ принадлежит всем сегментам некоторой стягивающейся системы $\left\{\left[\frac{p_k}{2^{n_k}}, \frac{p_k+1}{2^{n_k}}\right]\right\}$ сегментов [3]). Поставим в соответствие этой точке t общую точку M стягивающейся системы треугольников $\left\{T\left[\frac{p_k}{2^{n_k}}, \frac{p_k+1}{2^{n_k}}\right]\right\}$. Таким образом, каждому значению t из сегмента $[0, 1]$ ставится в соответствие два числа x и y — координаты точки M. Следовательно, x и y являются функциями параметра t. Убедимся, что эти функции $x = \varphi(t)$ и $y = \psi(t)$ непрерывны на сегменте $[0, 1]$. В самом деле, пусть ε — любое данное положительное число, t — данная точка сегмента $[0, 1]$ и M — точка кривой L, определяемая этим значением параметра t. Из стягивающейся системы $\left\{T\left[\frac{p_k}{2^{n_k}}, \frac{p_k+1}{2^{n_k}}\right]\right\}$ треугольников, определяющих точку M, выберем треугольник, диаметр которого меньше ε, и рассмотрим сегмент $\left[\frac{p_k}{2^{n_k}}, \frac{p_k+1}{2^{n_k}}\right]$, который содержит точку t, определяющую M (а следовательно, x и y). Все точки кривой L, определяемые значениями t из этого сегмента, расположены в указанном выше треугольнике, и поэтому их координаты отличаются от координат точки M не более чем на ε. Но это означает, что функции $\varphi(t)$ и $\psi(t)$ непрерывны в указанной точке.

0 1/8 1/4 3/8 1/2 5/8 3/4 7/8 1 t

Рис. 11.20

2. Перейдем к построению неквадрируемой фигуры Q. Рассмотрим квадрат $\underline{Q}$, сторона которого равна 2. На каждой стороне этого квадрата построим равнобедренные прямоугольные треугольники T_1, T_2, T_3, T_4, в результате мы получим квадрат $\overline{Q}$ со стороной $2\sqrt{2}$ (рис. 11.21). Затем из каждого такого треугольника произведем удаление полуоткрытых треугольников так, как это описано выше, в п. 1. В результате мы получим фигуру Q, ограниченную замкнутой кривой, состоящей из четырех кривых, конгруэнтных [4]) кривой L (см. п. 1). Докажем, что полученная фигура Q неква-

[1]) То, что различным t отвечают различные точки множества M, очевидно из построения кривой L.

[2]) Отметим, что каждому такому треугольнику отвечает только один сегмент $\left[\frac{p}{2^n}, \frac{p+1}{2^n}\right]$.

[3]) Пусть t — любая точка сегмента $[0, 1]$ и n — любое целое положительное число. Тогда, очевидно, точка t принадлежит некоторому сегменту $\left[\frac{p}{2^n}, \frac{p+1}{2^n}\right]$, причем каждый такой сегмент, отвечающий номеру $n + 1$, содержится в сегменте, который отвечает номеру n.

[4]) Множества A и B называются *конгруэнтными*, если они могут быть совмещены движением.

дрируема. Рассмотрим две специальные последовательности многоугольников $\{\underline{Q}_n\}$ и $\{\overline{Q}_n\}$, первая из которых состоит из вписанных в фигуру Q многоугольников, а вторая из описанных вокруг Q многоугольников. Последовательность $\{\underline{Q}_n\}$ получается посредством присоединения к квадрату $\underline{Q}$ полуоткрытых треугольников, удаляемых из треугольников T_1, T_2, T_3, T_4 на каждом нечетном шаге процесса, описанного в п. 1. Последовательность $\{\overline{Q}_n\}$ получается посредством удаления из квадрата $\overline{Q}$ полуоткрытых треугольников, удаляемых из треугольников T_1, T_2, T_3, T_4 на каждом четном шаге процесса, описанного в п. 1. Очевидно, что любой вписанный в фигуру Q многоугольник содержится в каком-нибудь многоугольнике $\underline{Q}_n$, а любой описанный вокруг фигуры Q многоугольник содержит какой-нибудь многоугольник $\overline{Q}_n$. Поэтому предел последовательности $\{\underline{S}_n\}$ площадей многоугольников $\underline{Q}_n$ равен *нижней площади* $\underline{P}$ фигуры Q, а предел последовательности $\{\overline{S}_n\}$ площадей многоугольников $\overline{Q}_n$ равен *верхней площади* $\overline{P}$ фигуры Q. Легко убедиться, что $\underline{S}_n = 4 + \sum\limits_{k=1}^{n} \frac{1}{4^{k-1}}$, а $\overline{S}_n = 8 - \frac{1}{2}\sum\limits_{k=1}^{n} \frac{1}{4^{k-1}}$ [1]. Поэтому $\underline{P} = \lim\limits_{n\to\infty} \underline{S}_n = 16/3$, а $\overline{P} = \lim\limits_{n\to\infty} \overline{S}_n = 22/3$. Так как $\overline{P} \neq \underline{P}$, то *фигура Q неквадрируема.* Отметим, что разность $\overline{P} - \underline{P} = 2$. Таким образом, граница рассматриваемой фигуры Q имеет площадь, равную 2.

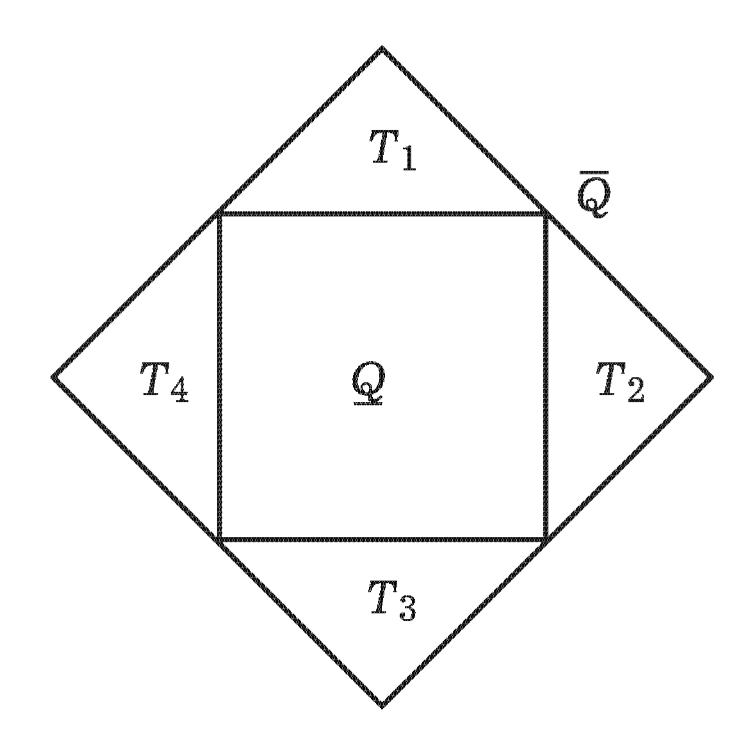


Рис. 11.21

3. Докажем, что *любая часть кривой L, ограниченная двумя различными точками, неспрямляема.* Докажем сначала, что такая часть L' кривой L имеет отличную от нуля площадь, т. е. любой многоугольник, покрывающий L', имеет площадь, большую некоторого положительного числа. Заметим, что L' содержит часть L'', отвечающую точкам некоторого сегмента $\left[\frac{p}{2^n}, \frac{p+1}{2^n}\right]$, и поэтому L'' содержится в треугольнике $T\left[\frac{p}{2^n}, \frac{p+1}{2^n}\right]$ и может быть получена посредством удаления из этого треугольника определенных полуоткрытых треугольников (см. п. 1 настоящего дополнения). Легко подсчитать, что сумма S площадей всех удаляемых полуоткрытых треугольников меньше площади S_T треугольника $T\left[\frac{p}{2^n}, \frac{p+1}{2^n}\right]$. Следовательно, часть L'' имеет площадь, равную $S_T - S > 0$. В § 2 этой главы при доказательстве квадрируемости фигуры, ограниченной спрямляемой кривой, мы доказали, что площадь спрямляемой кривой равна нулю (спрямляемую кривую можно покрыть многоугольником сколь угодно малой площади). Поэтому часть L'' кривой L, а следовательно, и часть L', содержащая L'', неспрямляема.

З а м е ч а н и е. Каждая из построенных функций $\varphi(t)$ и $\psi(t)$ *не имеет производной ни в одной точке сегмента* $[0, 1]$.

---

[1]) Эти формулы легко получить, если учесть, что суммы площадей треугольников, удаляемых на нечетных шагах процесса, образуют геометрическую прогрессию $1, 1/4, \ldots$, а суммы площадей треугольников, удаляемых на четных шагах процесса, — геометрическую прогрессию $1/2, 1/8, \ldots$

ГЛАВА 12

ПРИБЛИЖЕННЫЕ МЕТОДЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ КОРНЕЙ УРАВНЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕННЫХ ИНТЕГРАЛОВ

В этой главе рассматриваются приближенные методы нахождения корней алгебраических и трансцендентных уравнений и вычисления определенных интегралов.

§ 1. Приближенные методы вычисления корней уравнений

В этом параграфе мы займемся приближенным вычислением одного из корней уравнения $f(x) = 0$, где $y = f(x)$ — некоторая непрерывная или дифференцируемая функция. Будем считать, что интересующий нас корень c этого уравнения изолирован на некотором сегменте $[a, b]$, т. е. будем считать, что этот корень является внутренней точкой сегмента $[a, b]$, не содержащего других корней рассматриваемого уравнения. На практике обычно путем грубой прикидки определяют размеры указанного сегмента $[a, b]$ [1]).

1. Метод «вилки». Начнем с метода, который часто используется для приближенного вычисления корней на современных быстродействующих математических машинах.

Пусть интересующий нас корень c уравнения $f(x) = 0$ изолирован на некотором сегменте $[a, b]$. Относительно функции $f(x)$ мы предположим, что она непрерывна на сегменте $[a, b]$ и имеет на концах этого сегмента значения разных знаков. В дальнейшем для краткости мы будем называть *«вилкой»* всякий сегмент, на концах которого $f(x)$ имеет значения разных знаков.

Перейдем к описанию метода отыскания корня уравнения $f(x) = 0$, называемого *методом «вилки»*.

---

[1]) При этом может быть использована вытекающая из физического содержания задачи дополнительная информация о расположении корня.

Ради определенности будем считать, что $f(a) < 0$, $f(b) > 0$. Разделим сегмент $[a, b]$ пополам. При этом может представиться два случая: 1) значение функции в середине сегмента $[a, b]$ равно нулю (в этом случае искомый корень найден); 2) указанное значение не равно нулю. В этом случае одна из половин сегмента $[a, b]$ является вилкой. Эту половину мы обозначим $[a_1, b_1]$. Очевидно, что $f(a_1) < 0$, $f(b_1) > 0$. С сегментом $[a_1, b_1]$ поступим точно так же, как с сегментом $[a, b]$, т. е. разделим сегмент $[a_1, b_1]$ пополам. Продолжая аналогичные рассуждения далее, мы будем иметь две возможности: 1) либо описанный выше процесс оборвется вследствие того, что значение функции в середине некоторого из сегментов окажется равным нулю (в этом случае искомый корень найден); 2) либо описанный процесс можно продолжать неограниченно, и мы получим стягивающуюся систему сегментов-вилок $[a_1, b_1]$, $[a_2, b_2]$, ..., $[a_n, b_n]$, ..., причем для любого номера n $f(a_n) < 0$, $f(b_n) > 0$. Указанная стягивающаяся система сегментов имеет одну общую точку c, к которой сходится каждая из последовательностей $\{a_n\}$ и $\{b_n\}$ (см. следствие из теоремы 3.15). Докажем, что c и является искомым корнем, т. е. $f(c) = 0$. Поскольку функция $f(x)$ непрерывна в точке c, то каждая из последовательностей $\{f(a_n)\}$ и $\{f(b_n)\}$ сходится к $f(c)$. Но тогда из условий $f(a_n) < 0$, $f(b_n) > 0$, в силу теоремы 3.13 и замечания к этой теореме, получим, что одновременно справедливы неравенства $f(c) \leqslant 0$ и $f(c) \geqslant 0$, т. е. $f(c) = 0$.

Проведенные выше рассуждения дают алгоритм отыскания искомого корня c. За приближенное значение этого корня можно взять точку $\dfrac{a_n + b_n}{2}$, т. е. середину сегмента $[a_n, b_n]$. Поскольку длина сегмента $[a_n, b_n]$ равна $\dfrac{b-a}{2^n}$, то число $\dfrac{a_n + b_n}{2}$ отличается от точного значения корня не более чем на $\dfrac{b-a}{2^{n+1}}$. Таким образом, описанный выше процесс последовательного деления сегментов-вилок пополам позволяет вычислить искомый корень c с любой наперед заданной степенью точности. Так как описанный процесс приводит к многократному повторению *однотипных* вычислительных операций, он особенно удобен для проведения вычислений на быстродействующих математических машинах.

2. Метод касательных[1]**.** Метод касательных является одним из самых эффективных приближенных методов вычисления корней уравнения $f(x) = 0$.

Пусть искомый корень c уравнения $f(x) = 0$ изолирован на сегменте $[a, b]$. Перейдем к описанию метода касательных, не выясняя пока условий, при которых применим этот метод.

---

[1]) Этот метод называют также *методом Ньютона*.

Обратимся к рассмотрению графика функции $f(x)$ на сегменте $[a, b]$ (рис. 12.1). Возьмем за нулевое приближение искомого корня некоторое значение x_0 из сегмента $[a, b]$ и обозначим B_0 точку графика функции с абсциссой x_0. Проведем через точку B_0 касательную к графику функции и возьмем за первое приближение искомого корня абсциссу x_1 точки пересечения этой касательной с осью Ox [1]. Далее проведем касательную к графику функции через точку B_1 с абсциссой x_1 и возьмем за второе приближение абсциссу x_2 точки пересечения этой касательной с осью Ox. Продолжая этот процесс неограниченно, мы построим последовательность $x_0, x_1, \ldots, x_n, \ldots$ приближенных значений искомого корня.

В практических целях удобно получить рекуррентную формулу, выражающую x_{n+1} через x_n. Для этого возьмем уравнение $Y - f(x_n) = f'(x_n)(x - x_n)$ касательной к графику функции в точке B_n и вычислим абсциссу x_{n+1} точки пересечения этой касательной с осью Ox. При этом получим

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}. \qquad (12.1)$$

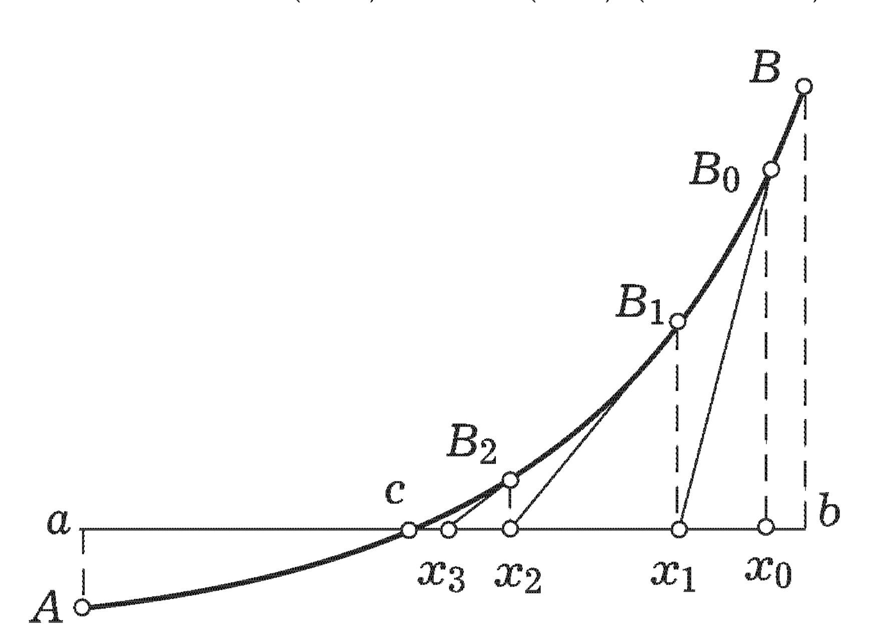


Рис. 12.1

Формула (12.1) определяет алгоритм метода касательных. Таким образом, метод касательных представляет собой метод последовательных приближений (или, как говорят, метод итераций), которые строятся при помощи рекуррентной формулы (12.1). Нашей дальнейшей задачей является обоснование метода касательных.

В п. 5 мы выясним условия, при которых последовательность значений x_n, определяемых формулой (12.1), сходится к искомому корню c, и дадим оценку погрешности, т. е. отклонения приближенного значения x_n от точного значения корня c.

3. Метод хорд. К числу широко распространенных приближенных методов решения уравнения $f(x) = 0$ относится метод хорд.

Перейдем к описанию этого метода, не выясняя пока условий, при которых он применим.

---

[1]) Так как касательная в точке B_0 представляет собой график дифференциала функции $y = f(x)$ в точке x_0, то указанный прием отыскания первого приближения x_1 основан *на замене функции ее дифференциалом* в точке x_0.

Предположим, что искомый корень c уравнения $f(x) = 0$ изолирован на сегменте $[a, b]$, и обратимся к рассмотрению графика функции $f(x)$ на этом сегменте (рис. 12.2). Возьмем за нулевое приближение искомого корня некоторое число x_0 из сегмента $[a, b]$ и обозначим A_0 и B точки графика функции с абсциссами x_0 и b. Проведем через точки A_0 и B графика функции хорду A_0B и возьмем за первое приближение искомого корня абсциссу x_1 точки пересечения этой хорды с осью Ox (см. рис. 12.2). Далее проведем хорду через точки графика функции A_1 с абсциссой x_1 и B. За второе приближение возьмет абсциссу x_2 точки пересечения хорды A_1B с осью Ox. Продолжая этот процесс неограниченно, мы построим последовательность $x_0, x_1, \ldots, x_n, \ldots$ приближенных значений искомого корня.

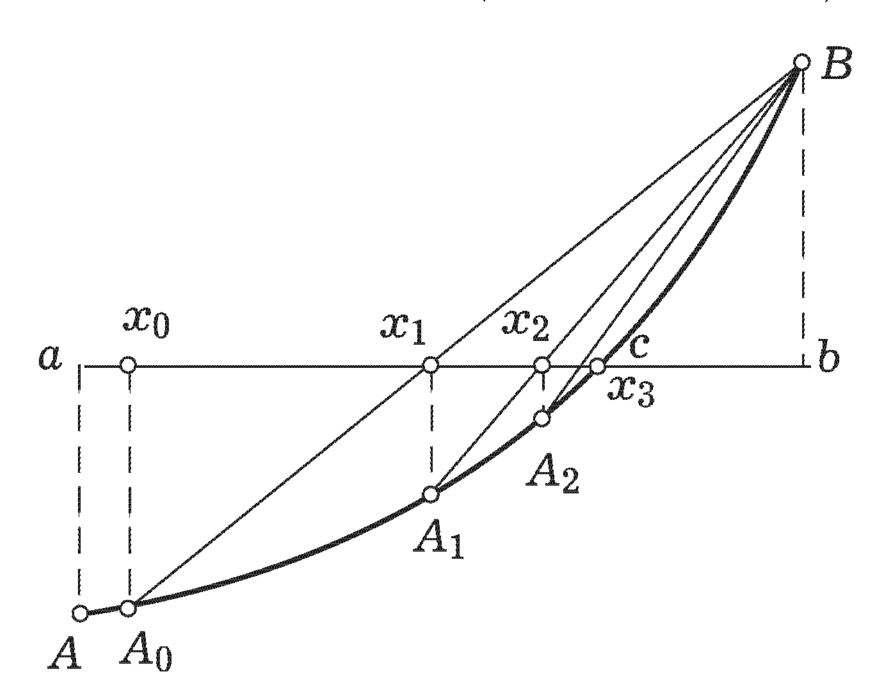


Рис. 12.2

В практических целях удобно получить рекуррентную формулу, выражающую x_{n+1} через x_n. Для этого возьмем уравнение $\dfrac{Y - f(x_n)}{f(b) - f(x_n)} = \dfrac{x - x_n}{b - x_n}$ хорды, проходящей через точки $A_n(x_n, f(x_n))$ и $B(b, f(b))$, и вычислим абсциссу x_{n+1} точки пересечения этой хорды с осью Ox. При этом получим

$$x_{n+1} = x_n - \frac{(b - x_n)f(x_n)}{f(b) - f(x_n)}. \qquad (12.2)$$

Формула (12.2) определяет алгоритм метода хорд. Таким образом, метод хорд представляет собой метод итераций, которые строятся при помощи рекуррентной формулы (12.2). Нашей дальнейшей задачей является обоснование метода хорд.

В п. 6 мы выясним условия, при которых последовательность значений x_n сходится к искомому корню c, и дадим оценку погрешности метода хорд.

4. Метод итераций (последовательных приближений). Из пп. 2 и 3 ясно, что методы касательных и хорд связаны общей идеей построения последовательных приближений к искомому корню. Эта идея и лежит в основе излагаемого в настоящем пункте метода.

Этот метод мы рассмотрим в применении к уравнению

$$x = F(x). \qquad (12.3)$$

Введем понятие *итерационной последовательности.*

Последовательность $x_0, x_1, \ldots, x_n, \ldots$ будем называть *итерационной*, если для любого $n \geqslant 1$ элемент x_n выражается через элемент x_{n-1} по рекуррентной формуле $x_n = F(x_{n-1})$, а в качестве x_0 взято любое число из области задания функции $F(x)$. Мы докажем, что при определенных условиях итерационная последовательность сходится к корню уравнения (12.3) и, стало быть, ее элементы могут быть взяты за приближенные значения этого корня.

Справедливо следующее утверждение.

Утверждение 1. *Пусть функция $F(x)$ непрерывна на сегменте $[a, b]$, и пусть все элементы итерационной последовательности $x_0, x_1, \ldots, x_n, \ldots$ лежат на этом сегменте. Тогда, если эта последовательность сходится к некоторому числу c, то указанное число c является корнем уравнения* (12.3).

Доказательство. Так как последовательность $\{x_n\}$ сходится к c и все ее элементы принадлежат сегменту $[a, b]$, то и предел c принадлежит сегменту $[a, b]$ (см. следствие 2 из теоремы 3.13). По условию функция $F(x)$ непрерывна в точке c, и поэтому последовательность $\{F(x_{n-1})\}$ сходится к $F(c)$. Таким образом, равенство $x_n = F(x_{n-1})$ в пределе при $n \to \infty$ переходит в равенство $c = F(c)$, т. е. c является корнем уравнения (12.3). Доказанное утверждение будет существенно использовано нами в пп. 5 и 6 для обоснования метода касательных и хорд.

Докажем еще одно утверждение, часто используемое для приближенного вычисления корня уравнения (12.3) с помощью итерационной последовательности.

Утверждение 2. *Пусть c — корень уравнения* (12.3), *и пусть в некотором симметричном относительно точки c сегменте $[c - \varepsilon, c + \varepsilon]$ производная функции $F(x)$ удовлетворяет условию $|F'(x)| \leqslant \alpha < 1$. Тогда итерационная последовательность $x_0, x_1, \ldots, x_n, \ldots$, у которой в качестве x_0 взято любое число из сегмента $[c-\varepsilon, c+\varepsilon]$, сходится к указанному корню c.*

Доказательство. Прежде всего докажем, что все элементы итерационной последовательности $\{x_n\}$ принадлежат указанному сегменту $[c-\varepsilon, c+\varepsilon]$. В самом деле, x_0 принадлежит этому сегменту по условию. Поэтому достаточно, предположив, что x_{n-1} принадлежит этому сегменту, доказать, что и x_n ему принадлежит. Для этого применим формулу Лагранжа к разности $F(x_{n-1}) - F(c)$ и учтем, что $F(c) = c$, $x_n = F(x_{n-1})$. Получим

$$x_n - c = F(x_{n-1}) - F(c) = F'(\xi)(x_{n-1} - c), \tag{12.4}$$

где ξ — некоторая точка, лежащая между x_{n-1} и c и, стало быть, принадлежащая сегменту $[c - \varepsilon, c + \varepsilon]$. Так как $|F'(\xi)| \leqslant \alpha < 1$,

то из равенства (12.4) получим

$$|x_n - c| \leqslant \alpha |x_{n-1} - c|. \tag{12.5}$$

Из (12.5), поскольку $0 < \alpha < 1$, в свою очередь получим

$$|x_n - c| < |x_{n-1} - c|. \tag{12.6}$$

Неравенство (12.6) устанавливает, что каждый последующий элемент x_n расположен к c ближе, чем предыдущий элемент x_{n-1}, и, стало быть, так как x_{n-1} принадлежит сегменту $[c - \varepsilon, c + \varepsilon]$ и так как этот сегмент симметричен относительно точки c, то и x_n принадлежит этому сегменту. Остается доказать, что последовательность $\{x_n\}$ сходится к c. Поскольку неравенство (12.5) справедливо для всех номеров n, то с помощью этого неравенства получим

$$|x_n - c| \leqslant \alpha^n |x_0 - c|. \tag{12.7}$$

Из последнего неравенства очевидно, что $x_n \to c$, ибо $\alpha^n \to 0$. Утверждение 2 доказано.

Сделаем практические замечания относительно только что доказанного утверждения. Предположим, что путем предварительной прикидки мы установили, что интересующий нас корень уравнении (12.3) изолирован на некотором сегменте $[a, b]$, на котором производная функция $F(x)$ удовлетворяет условию $|F'(x)| \leqslant \alpha < 1$.

Так как сегмент $[a, b]$, вообще говоря, *не является симметричным* относительно искомого корня, то, естественно, возникает вопрос о том, как выбрать нулевое приближение x_0, с тем, чтобы можно было применить доказанное выше утверждение 2. Заметим, что где бы внутри сегмента $[a, b]$ ни находился искомый корень c, хотя бы один из двух симметричных относительно c сегментов $[a, 2c - a]$ или $[2c - b, b]$ (рис. 12.3) *целиком принадлежит сегменту* $[a, b]$. Поэтому хотя бы одна из точек a или b принадлежит симметричному относительно корня c сегменту, всюду на котором $|F'(x)| \leqslant \alpha < 1$. Стало быть, по крайней мере одну из точек a или b можно, согласно доказанному выше утверждению 2, выбрать за x_0. Конкретно за x_0 следует выбрать ту из двух точек a или b, для которой приближение $x_1 = F(x_0)$ не выходит за пределы сегмента $[a, b]$.

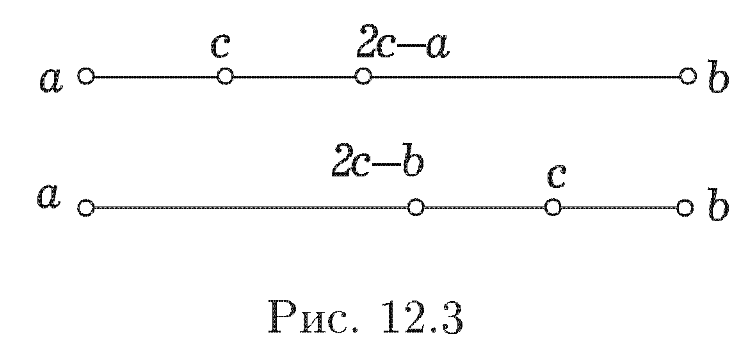


Рис. 12.3

На практике чаще всего встречается случай, когда производная $F'(x)$ имеет на сегменте $[a, b]$ определенный знак. Если этот знак положителен, то из формулы (12.4) следует, что последовательность $\{x_n\}$ монотонна. Этот случай приводит к так называемой *ступенчатой диаграмме*, изображенной на рис. 12.4. Если же производная $F'(x)$ отрицательна на сегменте $[a, b]$, то из той же формулы (12.4) видно, что любые два последовательных элемента x_{n-1} и x_n лежат по разные стороны от корня c. Этот

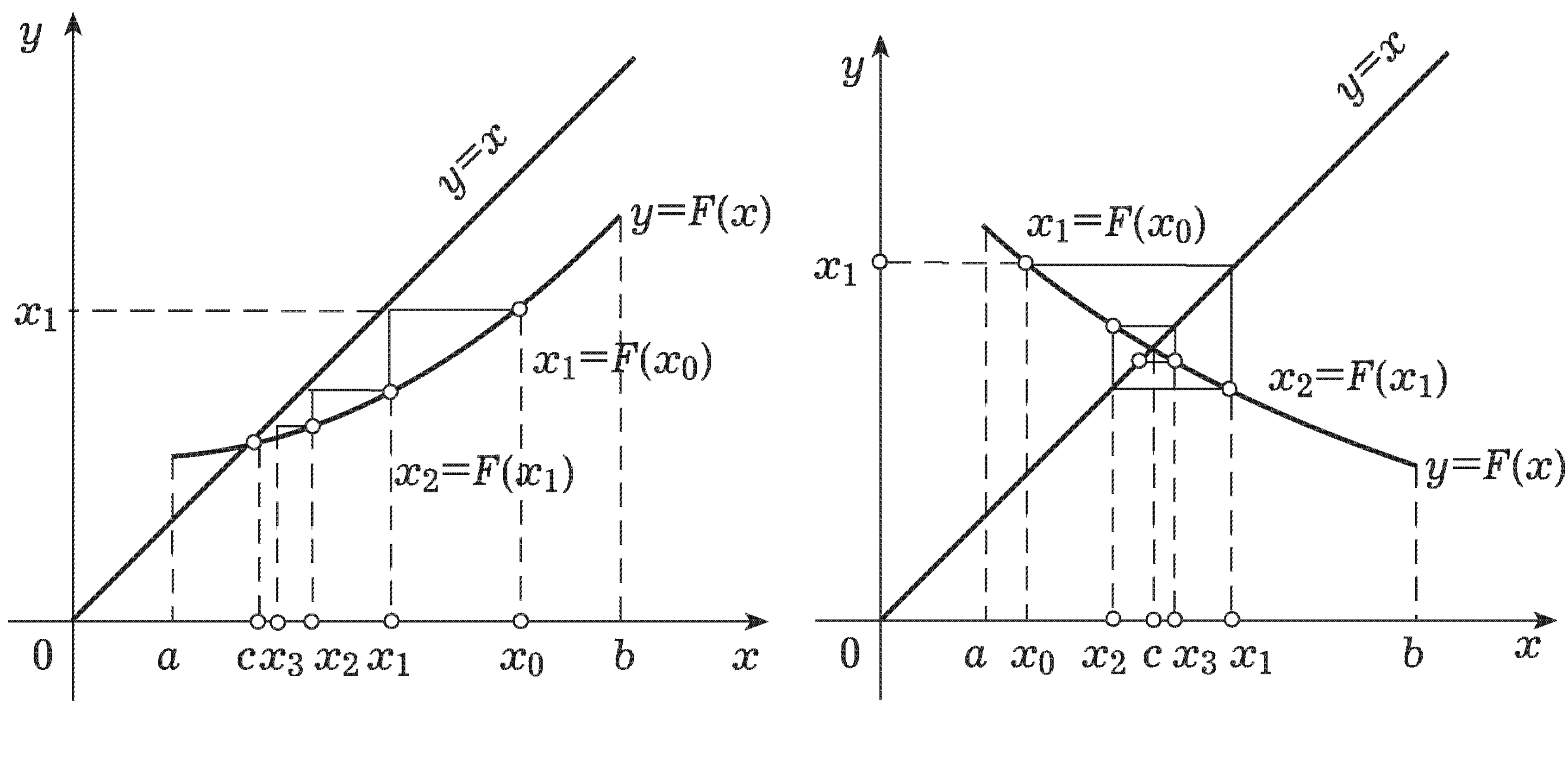


Рис. 12.4 Рис. 12.5

случай приводит к так называемой *спиралеобразной диаграмме*, изображенной на рис. 12.5.

Замечание. Возникает вопрос об оценке погрешности метода итераций, т. е. об оценке отклонения n-го приближения x_n от точного значения корня c. Из формулы (12.7) непосредственно вытекает следующая оценка:

$$|x_n - c| \leqslant \alpha^n (b - a),$$

где α — точная верхняя грань функции $|F'(x)|$ на сегменте $[a, b]$, на котором изолирован рассматриваемый корень. Если производная $F(x)$ отрицательна на сегменте $[a, b]$, то, как указано выше, x_{n-1} и x_n лежат по разные стороны от корня c, и поэтому справедлива следующая оценка:

$$|x_n - c| \leqslant |x_n - x_{n-1}|.$$

Если же в рассматриваемом случае взять за приближенное значение корня полусумму двух последовательных приближений

$$x_n^* = \frac{x_n + x_{n-1}}{2},$$

то получим следующую оценку погрешности:

$$|x_n^* - c| \leqslant \frac{|x_n - x_{n-1}|}{2}.$$

5. Обоснование метода касательных.

1°. Рассмотрим сначала случай, когда искомый корень c уравнения $f(x) = 0$ изолирован на некотором сегменте $[a, b]$, на котором функция $f(x)$ имеет *не обращающуюся в нуль первую производную и ограниченную вторую производную*. Докажем, что в этом случае найдется такая достаточно малая окрестность корня c, что если нулевое приближение x_0 лежит в этой окрест-

ности, то последовательность $\{x_n\}$, определяемая рекуррентной формулой (12.1), сходится к корню c.

Прежде всего, заметим, что уравнение

$$x = F(x), \quad \text{где} \quad F(x) = x - \frac{f(x)}{f'(x)} \tag{12.8}$$

имеет на сегменте $[a, b]$ только один корень c, совпадающий с корнем уравнения $f(x) = 0$. Поэтому вместо уравнения $f(x) = 0$ мы будем решать уравнение (12.8). Для этого, взяв некоторое x_0, построим итерационную последовательность

$$x_{n+1} = F(x_n) = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}. \tag{12.9}$$

Заметим, что рекуррентная формула (12.9) в точности совпадает с рекуррентной формулой (12.1).

Чтобы доказать сходимость итерационной последовательности $\{x_n\}$ к искомому корню c, достаточно доказать, что в некоторой ε-окрестности корня c производная $F'(x)$ удовлетворяет условию $|F'(x)| \leqslant \alpha < 1$, и взять x_0 в указанной ε-окрестности (см. утверждение 2 из п. 4). В силу требований, наложенных на функцию $f(x)$, найдутся положительные числа m и N такие, что всюду на сегменте $[a, b]$ выполняются неравенства

$$|f'(x)| \geqslant m > 0\ ^{1)}, \quad |f''(x)| \leqslant N. \tag{12.10}$$

Поскольку

$$F'(x) = 1 - \frac{[f'(x)]^2 - f(x)f''(x)}{[f'(x)]^2} = \frac{f(x)f''(x)}{[f(x)]^2},$$

то из неравенств (12.10) вытекает следующая оценка:

$$|F'(x)| \leqslant \frac{|f(x)|N}{m^2}. \tag{12.11}$$

Из непрерывности функции $f(x)$ вытекает, что в некоторой ε-окрестности корня c эта функция удовлетворяет неравенству

$$|f(x)| \leqslant \frac{m^2}{N}\alpha, \tag{12.12}$$

где α — фиксированное число из интервала $0 < \alpha < 1$. Сопоставляя неравенства (12.11) и (12.12), мы получим, что всюду в указанной ε-окрестности корня

$$|F'(x)| \leqslant \alpha < 1.$$

Тем самым сходимость последовательности (12.9) к корню c доказана.

---

[1]) Эти неравенства вытекают из того, что производная $f'(x)$ непрерывна и не обращается в нуль на рассматриваемом сегменте.

З а м е ч а н и е 1. Мы доказали сходимость последовательности $\{x_n\}$ к корню c лишь при условии, что нулевое приближение x_0 лежит в достаточно малой ε-окрестности корня c. Выбор нужного x_0 без труда осуществляется на современной быстродействующей электронно-вычислительной машине при помощи нескольких проб.

З а м е ч а н и е 2. Оценим отклонение приближенного значения корня x_{n+1} от точного значения c. С этой целью разложим функцию $f(x)$ в окрестности x_n по формуле Тейлора с остаточным членом в форме Лагранжа: $f(x) = f(x_n) + f'(x_n)(x - x_n) + \frac{1}{2}f''(\xi)(x - x_n)^2$. Полагая в этой формуле $x = c$ и учитывая, что $f(c) = 0$, будем иметь

$$0 = f(x_n) + f'(x_n)(c - x_n) + \frac{1}{2}f''(\xi)(c - x_n)^2.$$

Вычитая из последней формулы формулу $f(x_n) + f'(x_n)(x_{n+1} - x_n) = 0$, которая вытекает из рекуррентного соотношения (12.9), получим

$$x_{n+1} - c = \frac{1}{2}\frac{f''(\xi)}{f'(x_n)}(x_n - c)^2.$$

Отсюда, используя принятые выше обозначения (12.10), придем к следующему неравенству:

$$|x_{n+1} - c| \leqslant \frac{N}{2m}|x_n - c|^2.$$

Последовательно применяя эту оценку для $n = 0, 1, 2, \ldots$, получим следующую оценку:

$$|x_{n+1} - c| \leqslant \left(\frac{N}{2m}\right)^n |x_0 - c|^{2n}.$$

2°. Дадим обоснование метода касательных при несколько иных предположениях.

Пусть искомый корень c уравнения $f(x) = 0$ изолирован на сегменте $[a, b]$, на котором $f(x)$ имеет *монотонную первую производную, сохраняющую определенный знак.* Эта производная обязательно непрерывна, ибо она не может иметь точек разрыва первого рода, а монотонная функция других точек разрыва не имеет.

Ради определенности предположим, что производная *не убывает и положительна* на сегменте $[a, b]$. Докажем, что итерационная последовательность $\{x_n\}$, у которой $x_0 = b$, а x_{n+1} определяется через x_n с помощью формулы (12.9), сходится к корню c.

Если для некоторого номера n окажется, что $x_n = c$, где c — искомый корень, то $f(x_n) = f(c) = 0$ и из формулы (12.9) получим, что и $x_{n+1} = c$. Продолжая аналогичные рассуждения, мы

последовательно докажем, что и $x_{n+2} = x_{n+3} = \ldots = c$, т. е. в этом случае итерационная последовательность $\{x_n\}$ сходится к искомому корню c.

Теперь докажем по индукции, что *если x_n удовлетворяет соотношениям $c < x_n \leqslant b$, то x_{n+1} удовлетворяет соотношениям $c \leqslant x_{n+1} \leqslant x_n \leqslant b$.*

Отсюда будет следовать, что все x_n принадлежат сегменту $[c, b]$ (ибо $x_0 = b$ принадлежит этому сегменту), а также тот факт, что последовательность $\{x_n\}$ является невозрастающей и потому сходящейся. В силу утверждения 1 из п. 4 сходимость последовательности $\{x_n\}$ и принадлежность всех ее элементов сегменту $[c, b]$ (а потому и сегменту $[a, b]$) завершает доказательство сходимости этой последовательности к искомому корню c.

Итак, остается доказать, что если x_n удовлетворяет соотношениям $c < x_n \leqslant b$, то x_{n+1} удовлетворяет соотношениям $c \leqslant \leqslant x_{n+1} \leqslant x_n$.

Пусть $c < x_n \leqslant b$. Тогда из формулы (12.9), учитывая, что $f(c) = 0$, получим

$$x_n - x_{n+1} = \frac{f(x_n) - f(c)}{f'(x_n)}.$$

Применяя к выражению, стоящему в числителе последней дроби, формулу Лагранжа, получим

$$x_n - x_{n+1} = (x_n - c)\frac{f'(\xi_n)}{f'(x_n)},$$

где $c < \xi_n < x_n$. В силу того, что производная функции $f(x)$ не убывает и положительна, дробь $\dfrac{f'(\xi_n)}{f'(x_n)}$ положительна и не превосходит единицы, т. е. $0 \leqslant x_n - x_{n+1} - x_n - c$ или $c \leqslant x_{n+1} \leqslant x_n$.

З а м е ч а н и е 3. Мы рассмотрели случай, когда $f'(x)$ не убывает и положительна на $[a, b]$. Возможны еще три случая: 1) $f'(x)$ не возрастает и отрицательна на $[a, b]$; 2) $f'(x)$ не возрастает и положительна на $[a, b]$; 3) $f'(x)$ не убывает и отрицательна на $[a, b]$.

В каждом из этих трех случаев обоснование метода касательных проводится в полной аналогии со случаем, рассмотренным выше. Отметим лишь, что в случае 1) за нулевое приближение следует взять значение $x_0 = b$, а в случаях 2) и 3) — значение $x_0 = a$. Это обеспечит принадлежность всех членов итерационной последовательности $\{x_n\}$ сегменту $[a, b]$ и сходимость этой последовательности к искомому корню c.

З а м е ч а н и е 4. Укажем оценку отклонения n-го приближения x_n от точного значения корня c (при сформулированных в этом пункте предположениях).

Применяя к выражению $f(x_n) = f(x_n) - f(c)$ формулу Лагранжа, будем иметь $f(x_n) = (x_n - c)f'(\xi_n)$. Отсюда получим следующую оценку:

$$|x_n - c| \leqslant \frac{|f(x_n)|}{m}, \tag{12.13}$$

где m — минимальное значение $|f'(x)|$ на сегменте $[a,b]$. Формула (12.13) позволяет оценить отклонение x_n от точного значения корня c через значение модуля заданной функции $y = f(x)$ в точке x_n.

6. Обоснование метода хорд. Предположим, что искомый корень c уравнения $f(x) = 0$ изолирован на некотором сегменте $[a,b]$, на котором функция $f(x)$ имеет *монотонную первую производную, сохраняющую постоянный знак.* Ради определенности будем считать, что эта производная не убывает и положительна на сегменте $[a,b]$. Заметим, что уравнение

$$x = F(x), \quad \text{где} \quad F(x) = x - \frac{(b-x)f(x)}{f(b)-f(x)} \ ^{1)} \tag{12.14}$$

имеет на сегменте $[a,b]$ только один корень c, совпадающий с корнем уравнения $f(x)=0$. Поэтому вместо уравнения $f(x)=0$ мы будем решать уравнение (12.14). Для этого, взяв $x_0 = a$, построим итерационную последовательность

$$x_{n+1} = F(x_n) = x_n - \frac{(b-x_n)f(x_n)}{f(b)-f(x_n)}. \tag{12.15}$$

Заметим, что рекуррентная формула (12.15) в точности совпадает с рекуррентной формулой (12.2).

Докажем, что последовательность $\{x_n\}$ сходится к искомому корню c.

Если для некоторого номера n окажется, что $x_n = c$, где c — искомый корень, то $f(x_n) = f(c) = 0$ и из формулы (12.15) получим, что и $x_{n+1} = c$. Продолжая аналогичные рассуждения, мы последовательно докажем, что и $x_{n+2} = x_{n+3} = \ldots = c$, т. е. итерационная последовательность $\{x_n\}$ сходится к искомому корню c.

Докажем теперь по индукции, что *если x_n удовлетворяет соотношениям $a \leqslant x_n < c$, то x_{n+1} удовлетворяет соотношениям $a \leqslant x_n \leqslant x_{n+1} \leqslant c$.*

Отсюда и из того, что $x_0 = a$, будет следовать, что все x_n принадлежат сегменту $[a,c]$ (и тем более сегменту $[a,b]$) и что последовательность $\{x_n\}$ является неубывающей (а потому и сходящейся).

---

[1]) При этом считаем, что $F(b) = b - \dfrac{f(b)}{f'(b)}$. Тогда функция $F(x)$ будет непрерывна на всем сегменте $[a,b]$.

В силу утверждения 1 из п. 4 это завершит доказательство сходимости итерационной последовательности $\{x_n\}$ к искомому корню c.

Итак, остается доказать, что если x_n удовлетворяет соотношениям $a \leqslant x_n < c$, то x_{n+1} удовлетворяет соотношениям $x_n \leqslant x_{n+1} \leqslant c$.

Пусть $a \leqslant x_n < c$. Из соотношения (12.15), учитывая, что $f(c) = 0$, получим

$$x_{n+1} - x_n = -\frac{(b - x_n)f(x_n)}{f(b) - f(x_n)} = \frac{(b - x_n)[f(c) - f(x_n)]}{[f(b) - f(c)] + [f(c) - f(x_n)]}.$$

Применяя к выражениям в квадратных скобках теорему Лагранжа, получим

$$x_{n+1} - x_n = \frac{(b - x_n)f'(\xi_n)}{(b - c)f'(\xi_n^*) + (c - x_n)f'(\xi_n)} \cdot (c - x_n), \tag{12.16}$$

где $x_n < \xi_n < c$, $c < \xi_n^* < b$, так что $\xi_n < \xi_n^*$. В силу неубывания и положительности производной $f'(x)$ можно записать, что $0 < f'(\xi_n) \leqslant f'(\xi_n^*)$. Отсюда следует, что дробь в правой части (12.16) положительна и, кроме того, не превосходит единицы (ибо $(b - c)f'(\xi_n^*) + (c - x_n)f'(\xi_n) \geqslant [(b - c) + (c - x_n)]f'(\xi_n) = (b - x_n)f'(\xi_n)$). Стало быть, $0 \leqslant x_{n+1} - x_n \leqslant c - x_n$, т. е. $x_n \leqslant x_{n+1} \leqslant x$.

З а м е ч а н и е 1. Мы рассмотрели случай, когда $f'(x)$ не убывает н положительна на $[a, b]$. Возможны еще три случая: 1) $f'(x)$ не возрастает и отрицательна на $[a, b]$; 2) $f'(x)$ не возрастает и положительна на $[a, b]$; 3) $f'(x)$ не убывает и отрицательна на $[a, b]$.

Эти три случая аналогичны рассмотренному выше. В случае 1) уравнение $f(x) = 0$, так же как и выше, заменяется уравнением (12.14) и в качестве нулевого приближения берется $x_0 = a$ (при этом последовательность $\{x_n\}$ также оказывается неубывающей). В случаях 2) и 3) уравнение $f(x) = 0$ заменяется не уравнением (12.14), а уравнением

$$x = F(x),$$

где

$$F(x) = x - \frac{(a - x)f(x)}{f(a) - f(x)}$$

и в качестве нулевого приближения берется точка $x_0 = b$ (при этом последовательность $\{x_n\}$ оказывается невозрастающей).

З а м е ч а н и е 2. Укажем, что для метода хорд справедлива та же самая оценка (12.13) отклонения x_n от корня c, что и для метода касательных.

З а м е ч а н и е 3. На практике часто используют комбинированный метод, заключающийся в поочередном применении метода хорд и метода касательных. Ради определенности предположим, что $f'(x)$ не убывает и положительна на сегменте $[a, b]$ (рис. 12.6). Определим x_1 по методу касательных, взяв за нулевое приближение точку b. После этого определим x_2, применяя метод хорд, но не к сегменту $[a, b]$, а к сегменту $[a, x_1]$. Далее, определим x_3 по методу касательных, исходя из уже найденного x_1, а x_4 по методу хорд, применяя его к сегменту $[x_2, x_3]$. Указанный процесс иллюстрируется на рис. 12.6.

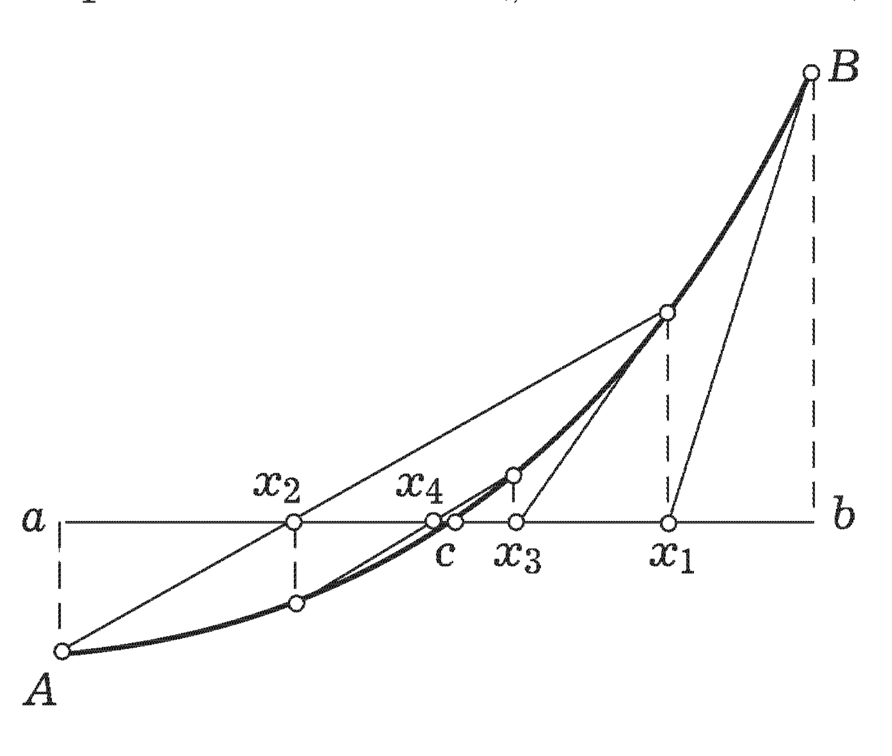


Рис. 12.6

Преимущества комбинированного метода состоят в следующем: во-первых, он дает более быструю сходимость, чем метод хорд, и, во-вторых, поскольку последовательные приближения x_n и x_{n+1} комбинированного метода с разных сторон приближаются к корню, то разность $|x_{n+1} - x_n|$ дает оценку погрешности этого метода. Если за приближенное значение корня взять $x_n^* = \dfrac{x_n + x_{n+1}}{2}$, то для погрешности получим оценку

$$|x_n^* - c| < \frac{|x_{n+1} - x_n|}{2}.$$

§ 2. Приближенные методы вычисления определенных интегралов

1. Вводные замечания. При решении ряда актуальных физических и технических задач встречаются определенные интегралы от функций, первообразные которых *не выражаются через элементарные функции*. Кроме того, в приложениях приходится иметь дело с определенными интегралами, сами *подынтегральные функции которых не являются элементарными*. Это приводит к необходимости разработки приближенных методов вычисления определенных интегралов [1]).

В этом параграфе мы познакомимся с тремя наиболее употребительными приближенными методами вычисления опреде-

[1]) Заметим, что приближенными методами часто пользуются и для интегралов, выражающихся через элементарные функции.

ленных интегралов: *методом прямоугольников*, *методом трапеций* и *методом парабол*.

Основная идея этих методов заключается в замене подынтегральной функции $f(x)$ функцией более простой природы — многочленом, совпадающим с $f(x)$ в некоторых точках. Для уяснения этой идеи рассмотрим при малых h интеграл $\int\limits_{-h}^{h} f(x)\,dx$, представляющий собой площадь узкой криволинейной трапеции, лежащей под графиком функции $y = f(x)$ на сегменте $[-h, h]$ (рис. 12.7).

Заменим функцию $f(x)$ многочленом нулевого порядка, а именно константой $f(0)$. При этом интеграл $\int\limits_{-h}^{h} f(x)\,dx$ приближенно заменится *площадью прямоугольника*, заштрихованного на рис. 12.8. Ниже мы покажем, что при определенных требованиях на $f(x)$ ошибка, совершаемая при такой замене, имеет

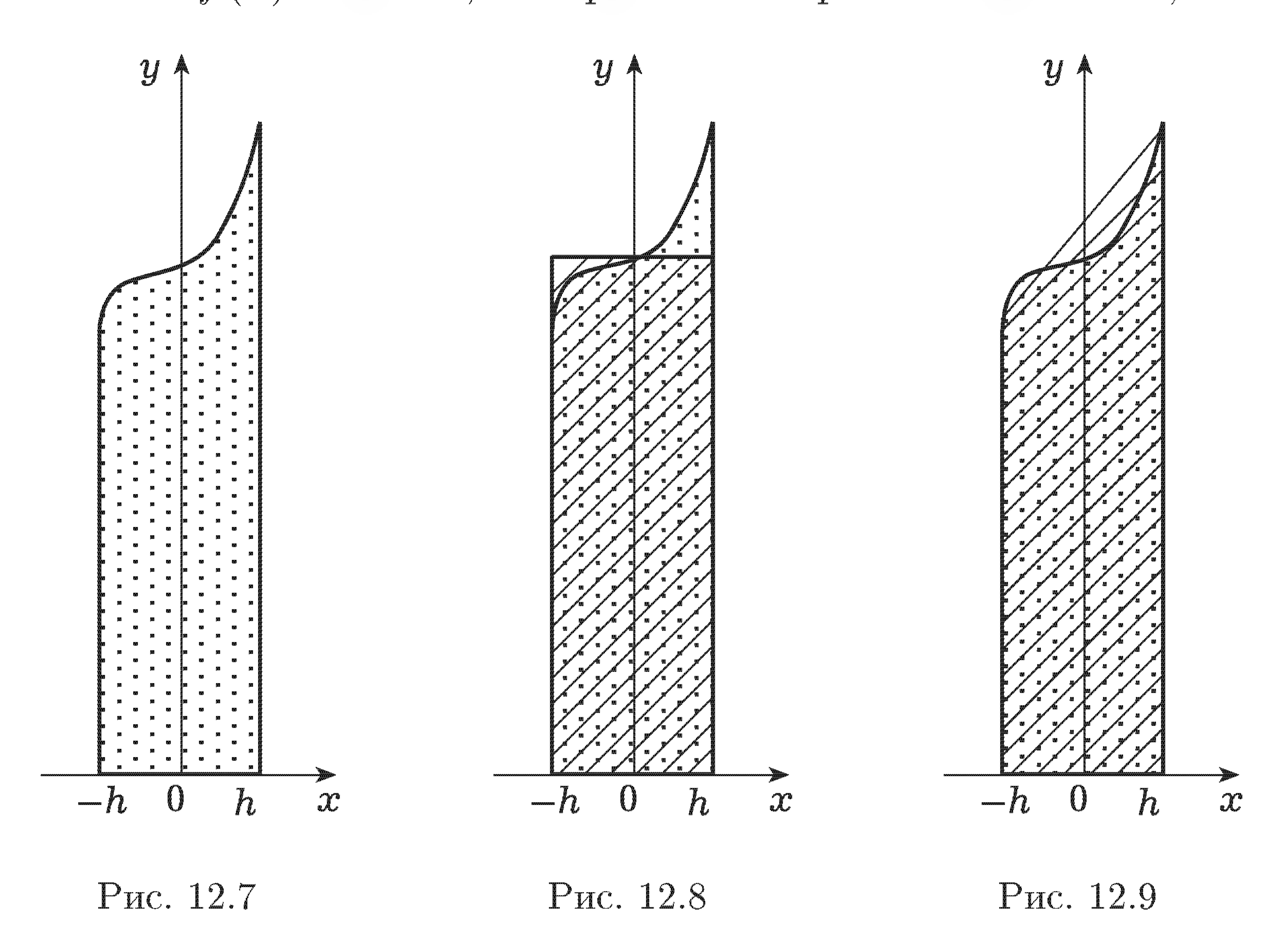


Рис. 12.7 Рис. 12.8 Рис. 12.9

порядок h^3. Заменим, далее, функцию $f(x)$ многочленом первого порядка, а именно линейной функцией $y = kx + b$, совпадающей с $f(x)$ в точках $-h$ и h. При этом интеграл $\int\limits_{-h}^{h} f(x)\,dx$ приближенно заменится *площадью прямолинейной трапеции*, заштрихованной на рис. 12.9. Ниже мы покажем, что при определенных требованиях на $f(x)$ ошибка, совершаемая при такой

замене, также имеет порядок h^3. Заменим, наконец, функцию $f(x)$ многочленом второго порядка, т. е. параболой $y = Ax^2 + Bx + C$, совпадающей с $f(x)$ в точках $-h$, 0 и h. При этом интеграл $\int\limits_{-h}^{h} f(x)\,dx$ приближенно заменится *площадью фигуры, лежащей под параболой* и заштрихованной на рис. 12.10.

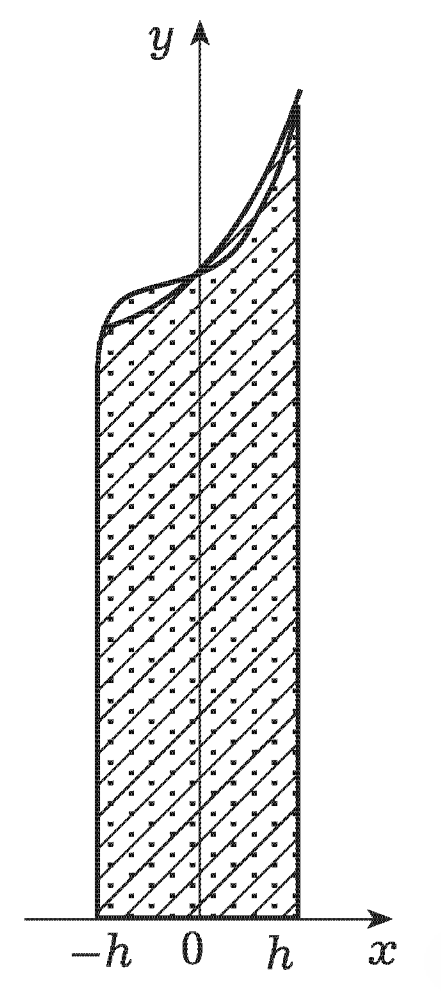


Рис. 12.10

Ниже мы покажем, что при определенных требованиях на функцию $f(x)$ ошибка, совершаемая при такой замене, имеет порядок h^5. Если требуется вычислить интеграл $\int\limits_a^b f(x)\,dx$ по любому сегменту $[a, b]$, то естественно этот сегмент разбить на достаточно большое число малых сегментов и к каждому из этих сегментов применить изложенные выше рассуждения. При этом мы и придем к методам прямоугольников, трапеций и парабол в их общем виде.

Детальное изложение каждого из этих трех методов дается ниже. Здесь же мы сделаем одно важное для дальнейшего замечание.

Замечание. *Пусть функция $f(x)$ непрерывна на сегменте $[a, b]$, а $x_1, x_2, \ldots, x_n$ — некоторые точки сегмента $[a, b]$. Тогда на этом сегменте найдется точка ξ такая, что среднее арифметическое $\dfrac{f(x_1) + f(x_2) + \ldots + f(x_n)}{n}$ равно $f(\xi)$.*

В самом деле, обозначим через m и M точные грани функции $f(x)$ на сегменте $[a, b]$. Тогда для любого номера k справедливы неравенства $m \leqslant f(x_k) \leqslant M$ $(k = 1, 2, \ldots, n)$. Просуммировав эти неравенства по всем номерам $k = 1, 2, \ldots, n$ и поделив результат на n, получим

$$m \leqslant \frac{f(x_1) + f(x_2) + \ldots + f(x_n)}{n} \leqslant M.$$

Так как непрерывная функция принимает любое промежуточное значение, заключенное между m и M, то на сегменте $[a, b]$ найдется точка ξ такая, что

$$f(\xi) = \frac{f(x_1) + f(x_2) + \ldots + f(x_n)}{n}. \qquad (12.17)$$

2. Метод прямоугольников. Пусть требуется вычислить интеграл

$$\int\limits_a^b f(x)\,dx. \qquad (12.18)$$

Разобьем сегмент $[a, b]$ на n *равных* частей при помощи точек $a = x_0 < x_2 < \ldots < x_{2n} = b$. Обозначим через x_{2k-1} среднюю точку сегмента $[x_{2k-2}, x_{2k}]$ (рис. 12.11). Метод прямоугольников заключается в замене интеграла (12.18) суммой

$$\frac{b-a}{n}[f(x_1) + f(x_3) + \ldots + f(x_{2n-1})]$$

площадей прямоугольников с высотами, соответственно равными $f(x_{2k-1})$, и основаниями, равными $x_{2k} - x_{2k-2} = \dfrac{b-a}{n}$ (эти прямоугольники заштрихованы на рис. 12.11). Таким образом, справедлива формула

$$\int\limits_a^b f(x)\,dx = \frac{b-a}{n}[f(x_1) + f(x_3) + \ldots + f(x_{2n-1})] + R, \quad (12.19)$$

где R — остаточный член. Формула (12.19) называется *формулой прямоугольников.*

Докажем, что если функция $f(x)$ имеет на сегменте $[a, b]$ непрерывную вторую производную, то на этом сегменте найдется такая точка η, что остаточный член R в формуле (12.19) равен

$$R = \frac{(b-a)^3}{24n^2} f^{(2)}(\eta). \quad (12.20)$$

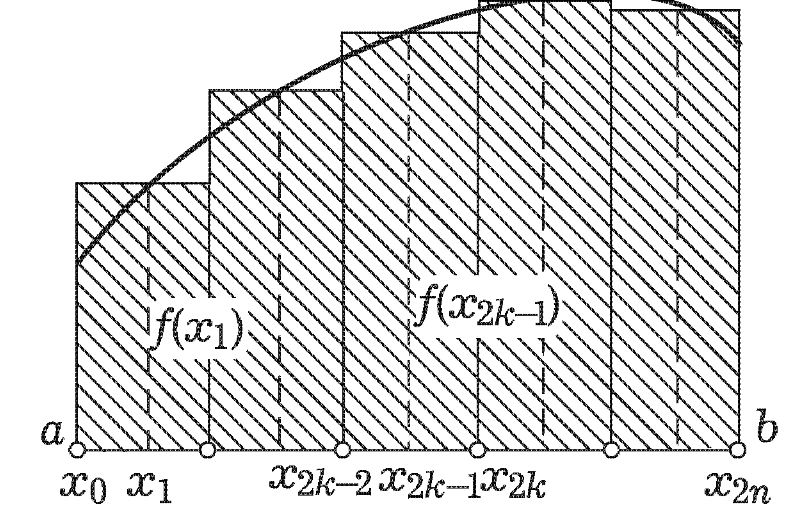


Рис. 12.11

С этой целью оценим сначала $\int\limits_{-h}^{+h} f(x)\,dx$, считая, что *функция $f(x)$ имеет на сегменте $[-h, +h]$ непрерывную вторую производную.*

Для этого подвергнем двукратному интегрированию по частям каждый из следующих двух интегралов:

$$I_1 = \int\limits_{-h}^{0} f^{(2)}(x)(x+h)^2 dx, \quad I_2 = \int\limits_{0}^{h} f^{(2)}(x)(x-h)^2 dx.$$

Для первого из этих интегралов получим

$$I_1 = \int_{-h}^{0} f^{(2)}(x)(x+h)^2 dx = [(x+h)^2 f'(x)]\Big|_{-h}^{0} - 2\int_{-h}^{0} f'(x)(x+h)\,dx =$$

$$= f'(0)h^2 - [2(x+h)\cdot f(x)]\Big|_{-h}^{0} + 2\int_{-h}^{0} f(x)\,dx =$$

$$= f'(0)h^2 - 2f(0)h + 2\int_{-h}^{0} f(x)\,dx.$$

Для второго из интегралов совершенно аналогично получим

$$I_2 = -f'(0)h^2 - 2\cdot f(0)h + 2\int_{0}^{h} f(x)\,dx.$$

Полусумма полученных для I_1 и I_2 выражений приводит к следующей формуле:

$$\int_{-h}^{h} f(x)\,dx = 2f(0)h + \frac{I_1 + I_2}{2}. \tag{12.21}$$

Оценим величину $\frac{I_1 + I_2}{2}$, применяя к интегралам I_1 и I_2 формулу среднего значения и учитывая неотрицательность функций $(x+h)^2$ и $(x-h)^2$. Мы получим, что найдутся точка ξ_1 на сегменте $[-h, 0]$ и точка ξ_2 на сегменте $[0, h]$ такие, что

$$\frac{I_1 + I_2}{2} = \frac{1}{2}\int_{-h}^{0} f^{(2)}(x)(x+h)^2 dx + \frac{1}{2}\int_{0}^{h} f^{(2)}(x)(x-h)^2 dx =$$

$$= -\frac{1}{2} f^{(2)}(\xi_1)\int_{-h}^{0}(x+h)^2 dx + \frac{1}{2} f^{(2)}(\xi_2)\int_{0}^{h}(x-h)^2 dx =$$

$$= \frac{h^3}{6} f^{(2)}(\xi_1) + \frac{h^3}{6} f^{(2)}(\xi_2) = \frac{h^3}{3}\,\frac{f^{(2)}(\xi_1) + f^{(2)}(\xi_2)}{2}.$$

В силу замечания в конце п. 1 на сегменте $[-h, +h]$ найдется точка η такая, что

$$\frac{f^{(2)}(\xi_1) + f^{(2)}(\xi_2)}{2} = f^{(2)}(\eta).$$

Поэтому для полусуммы $\frac{I_1 + I_2}{2}$ мы получим следующее выражение:

$$\frac{I_1 + I_2}{2} = \frac{h^3}{3} f^{(2)}(\eta).$$

Вставляя это выражение в (12.21), получим, что

$$\int_{-h}^{h} f(x)\, dx = 2f(0)h + \overline{R}, \tag{12.22}$$

где

$$\overline{R} = \frac{1}{24} f^{(2)}(\eta)(2h)^3 \quad (-h \leqslant \eta \leqslant h). \tag{12.23}$$

Так как величина $2f(0) \cdot h$ представляет собой площадь прямоугольника, заштрихованного на рис. 12.8, то формулы (12.22) и (12.23) доказывают, что ошибка, совершаемая при замене $\int_{-h}^{h} f(x)\, dx$ указанной площадью, имеет порядок h^3.

Таким образом, формула $\int_{-h}^{h} f(x)\, dx \approx 2f(0)h$ *тем точнее, чем меньше* h. Поэтому для вычисления интеграла $\int_a^b f(x)\, dx$ естественно представить этот интеграл в виде суммы достаточно большого числа n интегралов

$$\int_{x_0}^{x_2} f(x)\, dx + \int_{x_2}^{x_4} f(x)\, dx + \ldots + \int_{x_{2n-2}}^{x_{2n}} f(x)\, dx$$

и к каждому из указанных интегралов применить формулу (12.22). Учитывая при этом, что длина сегмента $[x_{2k-2}, x_{2k}]$ равна $\frac{b-a}{n}$, мы получим формулу прямоугольников (12.19), в которой

$$R = \overline{R}_1 + \overline{R}_2 + \ldots + \overline{R}_n = \frac{(b-a)^3}{24n^3}[f^{(2)}(\eta_1) + f^{(2)}(\eta_2) + \ldots + f^{(2)}(\eta_n)] =$$
$$= \frac{(b-a)^3}{24n^2} \frac{f^{(2)}(\eta_1) + f^{(2)}(\eta_2) + \ldots + f^{(2)}(\eta_n)}{n} = \frac{(b-a)^3}{24n^2} f^{(2)}(\eta).$$

(Здесь $a \leqslant \eta \leqslant b$. Мы воспользовались формулой (12.17) для функции $f^{(2)}(x)$.)

3. Метод трапеций. Пусть, как и выше, требуется вычислить интеграл

$$\int_a^b f(x)\,dx. \tag{12.18}$$

Разобьем сегмент $[a, b]$ на n равных частей при помощи точек $a = x_0 < x_1 < x_2 < \ldots < x_n = b$ (рис. 12.12). Метод трапеций заключается в замене интеграла (12.18) суммой

$$\frac{b-a}{2n}\{[f(x_0)+f(x_1)]+[f(x_1)+f(x_2)]+\ldots+[f(x_{n-1})+f(x_n)]\} = \\ = \frac{b-a}{2n}\left\{f(a)+f(b)+2\sum_{k=1}^{n-1} f(x_k)\right\}$$

площадей трапеций с основаниями, соответственно равными $f(x_{k-1})$ и $f(x_k)$, и с высотами, равными $x_k - x_{k-1} = \dfrac{b-a}{n}$ (эти трапеции заштрихованы на рис. 12.12).

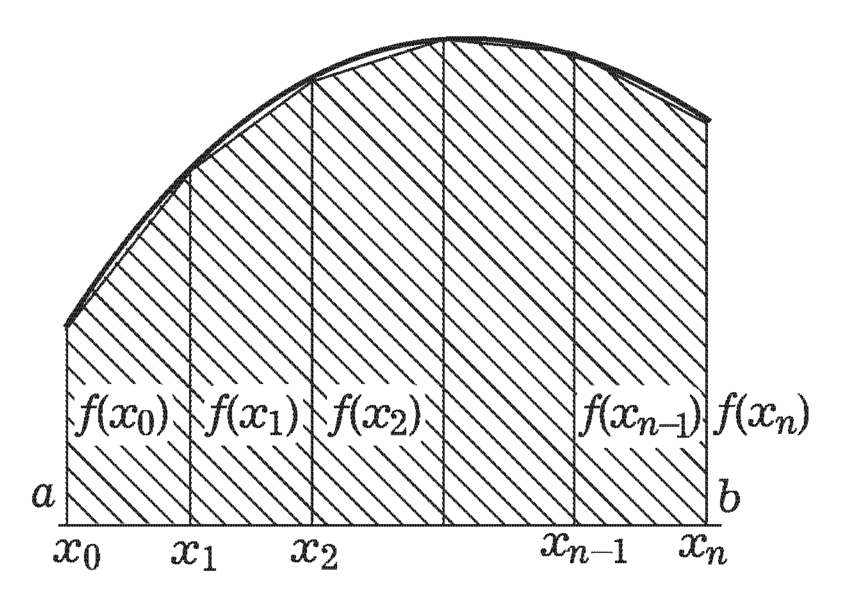


Рис. 12.12

Таким образом, справедлива формула

$$\int_a^b f(x)\,dx = \frac{b-a}{2n}\left\{f(a)+f(b)+ \right. \\ \left. +2\sum_{k=1}^{n-1} f(x_k)\right\} + R, \tag{12.24}$$

где R — остаточный член. Формула (12.24) называется *формулой трапеций.*

Докажем, что если функция $f(x)$ имеет на сегменте $[a, b]$ непрерывную вторую производную, то на этом сегменте найдется такая точка η, что остаточный член R в формуле (12.24) имеет вид

$$R = -\frac{(b-a)^3}{12n^2} f^{(2)}(\eta). \tag{12.25}$$

Оценим сначала интеграл $\int\limits_{-h}^{+h} f(x)\,dx$, считая, что *функция $f(x)$ имеет на сегменте $[-h, +h]$ непрерывную вторую производную.*

Подвергая интеграл $\int\limits_{-h}^{+h} f^{(2)}(x)(x^2-h^2)\,dx$ двукратному интегрированию по частям, получим

$$\int\limits_{-h}^{+h} f^{(2)}(x)(x^2-h^2)\,dx = [f'(x)(x^2-h^2)]\Big|_{-h}^{+h} - 2\int\limits_{-h}^{+h} f'(x)\,dx =$$

$$= -[2f(x)x]\Big|_{-h}^{+h} + 2\int\limits_{-h}^{+h} f(x)\,dx =$$

$$= -2[f(-h)+f(+h)]h + 2\int\limits_{-h}^{+h} f(x)\,dx. \quad (12.26)$$

В силу (12.26) приходим к формуле

$$\int\limits_{-h}^{h} f(x)\,dx = \frac{f(-h)+f(h)}{2}2h + \overline{R}, \quad (12.27)$$

где

$$\overline{R} = -\frac{1}{12}f^{(2)}(\eta)(2h)^3 \quad (-h \leqslant \eta \leqslant h). \quad (12.28)$$

Так как величина $\frac{f(-h)+f(h)}{2}2h$ представляет собой площадь трапеции, заштрихованной на рис. 12.9, то формулы (12.27) и (12.28) доказывают, что ошибка, совершаемая при замене $\int\limits_{-h}^{h} f(x)\,dx$ указанной площадью, имеет порядок h^3.

Для вычисления интеграла $\int\limits_a^b f(x)\,dx$, как и в методе прямоугольников, представим этот интеграл в виде суммы достаточно большого числа n интегралов

$$\int\limits_{x_0}^{x_1} f(x)\,dx + \int\limits_{x_1}^{x_2} f(x)\,dx + \ldots + \int\limits_{x_{n-1}}^{x_n} f(x)\,dx.$$

Применяя к каждому из этих интегралов формулы (12.27) и (12.28), мы и придем к формуле трапеций (12.24) с выражением для остаточного члена (12.25).

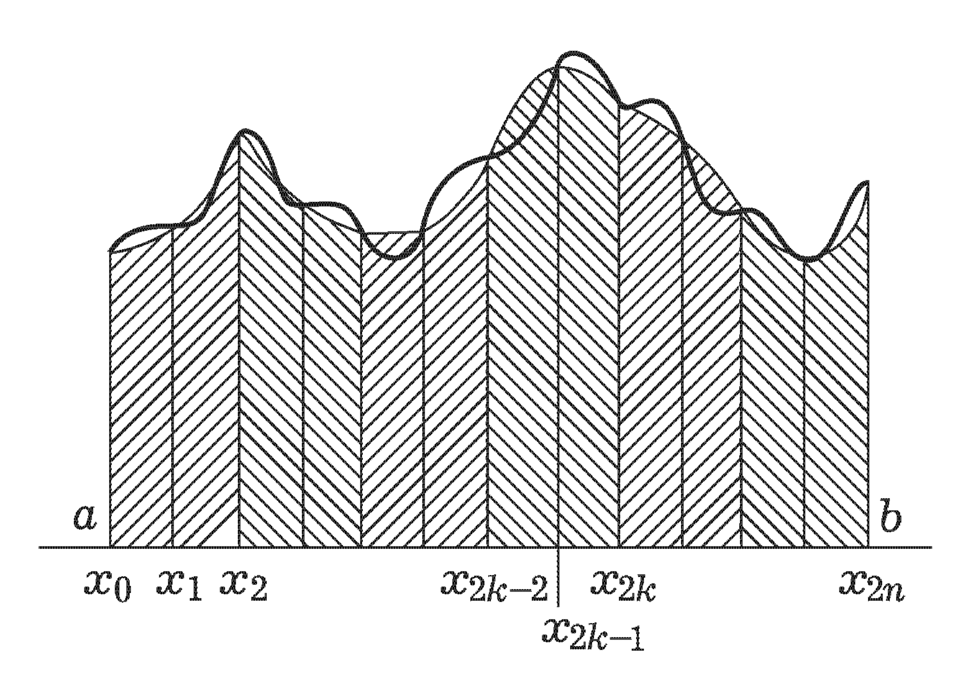


Рис. 12.13

4. Метод парабол. Для вычисления интеграла

$$\int_a^b f(x)\,dx \qquad (12.18)$$

снова разобьем сегмент $[a, b]$ на n равных частей при помощи точек $a = x_0 < x_2 < \ldots < x_{2n} = b$ и обозначим через x_{2k-1} середину сегмента $[x_{2k-2}, x_{2k}]$. Метод парабол заключается в замене интеграла (12.18) суммой

$$\frac{b-a}{6n}\{[f(x_0) + 4f(x_1) + f(x_2)] + [f(x_2) + 4f(x_3) + f(x_4)] + \ldots \\ \ldots + [f(x_{2n-2}) + 4f(x_{2n-1}) + f(x_{2n})]\} = \\ = \frac{b-a}{6n}\left\{f(a) + f(b) + 2\sum_{k=1}^{n-1} f(x_{2k}) + 4\sum_{k=0}^{n-1} f(x_{2k+1})\right\}$$

площадей фигур, заштрихованных на рис. 12.13 и представляющих собой криволинейные трапеции, лежащие под параболами, проходящими через три точки графика функция $f(x)$ с абсциссами x_{2k-2}, x_{2k-1} и x_{2k} [1]).

Таким образом, справедлива формула

$$\int_a^b f(x)\,dx = \frac{b-a}{6n}\left[f(a) + f(b) + 2\sum_{k=1}^{n-1} f(x_{2k}) + 4\sum_{k=0}^{n-1} f(x_{2k+1})\right] + R, \qquad (12.29)$$

где R — остаточный член. Формула (12.29) называется *формулой парабол* или *формулой Симпсона.*

Докажем, что если функция $f(x)$ имеет на сегменте $[a, b]$ непрерывную четвертую производную, то на этом сегменте найдется такая точка η, что остаточный член R в формуле (12.29) равен

$$R = -\frac{(b-a)^5}{2880n^4} f^{(4)}(\eta). \qquad (12.30)$$

---

[1]) Из примера 2 п. 4 § 2 гл. 11 вытекает, что выражение $\frac{b-a}{6n}[f(x_{2k-2}) + 4f(x_{2k-1}) + f(x_{2k})]$ с учетом того, что $\frac{b-a}{6n} = \frac{x_{2k} - x_{2k-2}}{6}$, представляет собой площадь, лежащую под параболой, проходящей через три точки графика функции $f(x)$ с абсциссами x_{2k-2}, x_{2k-1} и x_{2k}.

С этой целью оценим сначала $\int\limits_{-h}^{+h} f(x)\,dx$, считая, что *функция $f(x)$ имеет на сегменте $[-h,+h]$ непрерывную четвертую производную.*

Для этого подвергнем четырехкратному интегрированию по частям каждый из следующих двух интегралов:

$$I_1 = \int\limits_{-h}^{0} f^{(4)}(x)(x+h)^3\left(x-\frac{h}{3}\right)dx, \quad I_2 = \int\limits_{0}^{h} f^{(4)}(x)(x-h)^3\left(x+\frac{h}{3}\right)dx.$$

Для первого из этих интегралов получим

$$I_1 = \int\limits_{-h}^{0} f^{(4)}(x)(x+h)^3\left(x-\frac{h}{3}\right)dx = \left[f^{(3)}(x)(x+h)^3\left(x-\frac{h}{3}\right)\right]\Big|_{-h}^{0} -$$

$$- \left\{f^{(2)}(x)\left[3(x+h)^2\left(x-\frac{h}{3}\right)+(x+h)^3\right]\right\}\Big|_{-h}^{0} +$$

$$+ \left\{6f'(x)\left[(x+h)\left(x-\frac{h}{3}\right)+(x+h)^2\right]\right\}\Big|_{-h}^{0} -$$

$$- \left\{6f(x)\left(4x+\frac{8}{3}h\right)\right\}\Big|_{-h}^{0} + 24\int\limits_{-h}^{0} f(x)\,dx =$$

$$= -f^{(3)}(0)\frac{h^4}{3} + 4f'(0)h^2 - 8h[f(-h)+2f(0)] + 24\int\limits_{-h}^{0} f(x)\,dx. \tag{12.31}$$

Для I_2 совершенно аналогично получим

$$I_2 = f^{(3)}(0)\frac{h^4}{3} - 4f'(0)h^2 - 8h[f(h)+2f(0)] + 24\int\limits_{0}^{h} f(x)\,dx. \tag{12.32}$$

Посредством сложения соотношений (12.31) и (12.32) получим следующее равенство:

$$\int\limits_{-h}^{+h} f(x)\,dx = \frac{f(-h)+4f(0)+f(+h)}{6}\,2h + \frac{I_1+I_2}{24}. \tag{12.33}$$

Для оценки $\dfrac{I_1+I_2}{24}$ применим к интегралам I_1 и I_2 формулу среднего значения, учитывая неположительность функций $(x+h)^3\left(x-\dfrac{h}{3}\right)$ и $(x-h)^3\left(x+\dfrac{h}{3}\right)$ на сегментах $[-h,0]$ и $[0,+h]$ соответственно.

Мы получим, что найдутся точка ξ_1 на сегменте $[-h, 0]$ и точка ξ_2 на сегменте $[0, +h]$ такие, что

$$\frac{I_1 + I_2}{24} = \frac{1}{24}\left[f^{(4)}(\xi_1)\int\limits_{-h}^{0}(x+h)^3\left(x - \frac{h}{3}\right)dx + \right.$$

$$\left. + f^{(4)}(\xi_2)\int\limits_{0}^{+h}(x-h)^3\left(x + \frac{h}{3}\right)dx\right] = \frac{-h^5}{90}\,\frac{f^{(4)}(\xi_1) + f^{(4)}(\xi_2)}{2}.$$

Снова используя замечание в конце п. 1, мы получим, что на сегменте $[-h, +h]$ найдется точка η такая, что

$$\frac{I_1 + I_2}{24} = \frac{-h^5}{90} f^{(4)}(\eta). \tag{12.34}$$

Из (12.33) и (12.34) окончательно получим

$$\int\limits_{-h}^{h} f(x)\,dx = \frac{[f(-h) + 4f(0) + f(h)]}{6}\,2h + \overline{R}, \tag{12.35}$$

где

$$\overline{R} = -\frac{(2h)^5}{2880} f^{(4)}(\eta). \tag{12.36}$$

Так как величина $\dfrac{[f(-h) + 4f(0) + f(h)]}{6}\,2h$ представляет собой площадь фигуры, лежащей под параболой и заштрихованной на рис. 12.10, то формулы (12.35) и (12.36) доказывают, что ошибка, совершаемая при замене $\int\limits_{-h}^{h} f(x)\,dx$ указанной площадью, имеет порядок h^5.

Для вычисления интеграл $\int\limits_{a}^{b} f(x)\,dx$, так же как и в методах прямоугольников и трапеций, представим этот интеграл в виде суммы n интегралов

$$\int\limits_{x_0}^{x_2} f(x)\,dx + \int\limits_{x^2}^{x_4} f(x)\,dx + \ldots + \int\limits_{x_{2n-2}}^{x_{2n}} f(x)\,dx.$$

Применяя к каждому из этих интегралов формулы (12.35) и (12.36), мы и придем к формуле Симпсона (12.29) с выражением для остаточного члена (12.30).

Сравнивая остаточный член (12.30) с остаточными членами (12.20) и (12.25), мы убеждаемся в том, что формула Симпсо-

на дает бо́льшую точность, чем формулы прямоугольников и трапеций.

В качестве иллюстрации применения формулы Симпсона обратимся к вычислению интеграла $I(x_0) = \int\limits_0^{x_0} e^{-x^2}\,dx$ [1], ограничиваясь для простоты значениями x_0 из сегмента $0 \leqslant x_0 \leqslant 1$. Полагая $f(x) = e^{-x^2}$ и вычисляя производную $f^{(4)}(x) = 4(4x^4 - 12x^2 + 3)e^{-x^2}$, без труда убедимся в том, что для всех x из сегмента $0 \leqslant x \leqslant x_0 \leqslant 1$ во всяком случае $|f^{(4)}(x)| < 20$. Исходя из оценки (12.30), можем утверждать, что $|R| < \dfrac{1}{144n^4}$. Стало быть, разбив сегмент $[0, x_0]$ всего на пять равных частей и заменив рассматриваемый интеграл суммой, стоящей в правой части формулы Симпсона, мы вычислим этот интеграл с точностью до $\dfrac{1}{144\cdot 5^4} = \dfrac{1}{90\,000}$.

5. Заключительные замечания. Каждый из изложенных в этой главе методов вычисления корней уравнений и определенных интегралов *содержит четко сформулированный алгоритм* для проведения вычислений. Другой особенностью изложенных методов является *стереотипность* тех вычислительных операций, которые приходится проводить на каждом отдельном шаге. Эти две особенности обеспечивают широкое применение изложенных методов для проведения вычислений на современных быстродействующих вычислительных машинах.

Выше для приближенного вычисления интеграла (12.18) от функции $f(x)$ мы исходили из разбиения основного сегмента $[a, b]$ на достаточно большое число n р а в н ы х частичных сегментов одинаковой длины h и из последующей замены функции $f(x)$ на каждом частичном сегменте многочленом соответственно нулевого, первого или второго порядка.

Погрешность, возникающая при таком подходе, никак не учитывает индивидуальных свойств функции $f(x)$. Поэтому, естественно, возникает идея о варьировании точек разбиения основного сегмента $[a, b]$ и выборе для каждой фиксированной функции $f(x)$ такого оптимального разбиения основного сегмента $[a, b]$ на n, вообще говоря, не равных друг другу частичных сегментов, которое обеспечивало бы минимальную величину погрешности данной приближенной формулы.

В Дополнении к гл. 14 мы остановимся на реализации указанной идеи, принадлежащей А.Н. Тихонову и С.С. Гайсаряну.

---

[1]) Рассматриваемый интеграл не выражается через элементарные функции. Этот интеграл широко применяется в статистической физике, теории теплопроводности и диффузии.

ГЛАВА 13

ТЕОРИЯ ЧИСЛОВЫХ РЯДОВ

Еще в элементарном курсе приходилось сталкиваться с суммами, содержащими *бесконечное* число слагаемых (например, с суммой бесконечного числа элементов геометрической прогрессии). Такого рода суммы, называемые *рядами*, и изучаются в настоящей главе. Мы установим, что при некоторых условиях ряды обладают свойствами, аналогичными свойствам конечных сумм.

§ 1. Понятие числового ряда

1. Ряд и его частичные суммы. Сходящиеся и расходящиеся ряды. Рассмотрим бесконечную числовую последовательность $u_1, u_2, \ldots, u_k, \ldots$ и формально образуем из элементов этой последовательности выражение вида

$$u_1 + u_2 + \ldots + u_k + \ldots = \sum_{k=1}^{\infty} u_k. \tag{13.1}$$

Выражение (13.1) принято называть *числовым рядом* или просто *рядом*. Отдельные элементы u_k, из которых образовано выражение (13.1), принято называть *членами данного ряда*. Как правило, мы будем пользоваться для обозначения ряда символом суммы $\sum$.

Сумму первых n членов данного ряда будем называть n-й ч а с т и ч н о й с у м м о й *данного ряда и обозначать символом S_n*. Итак, $S_n = u_1 + u_2 + \ldots + u_n = \sum\limits_{k=1}^{n} u_k$. *Ряд* (13.1) *называется* с х о д я щ и м с я, *если сходится последовательность $\{S_n\}$ частичных сумм этого ряда. При этом предел S последовательности частичных сумм $\{S_n\}$ называется* с у м м о й *данного ряда.* Таким образом, для сходящегося ряда, имеющего

сумму S, мы можем формально записать равенство

$$S = \sum_{k=1}^{\infty} u_k.$$

В случае, если $\lim\limits_{n\to\infty} S_n$ *не существует, ряд называется р а с х о д я щ и м с я.*

Подчеркнем, что понятие суммы определено лишь для сходящегося ряда и, в отличие от понятия конечной суммы, вводится посредством предельного перехода [1]).

Заметим, что рассмотрение числовых рядов есть новая форма изучения числовых последовательностей, ибо: 1) каждому данному ряду однозначно соответствует последовательность его частичных сумм; 2) каждой данной последовательности $\{S_n\}$ однозначно соответствует ряд, для которого эта последовательность является последовательностью его частичных сумм (достаточно положить члены ряда равными $u_k = S_k - S_{k-1}$ при $k > 1$ и $u_1 = S_1$).

Одной из главных задач теории числовых рядов является установление признаков, по которым можно решить вопрос о сходимости или расходимости данного ряда.

П р и м е р ы ч и с л о в ы х р я д о в.

1. Изучим вопрос о сходимости ряда

$$1 - 1 + 1 - 1 + \ldots = \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k-1}. \tag{13.2}$$

Поскольку последовательность его частичных сумм $S_1 = 1$, $S_2 = 0, \ldots, S_{2n-1} = 1$, $S_{2n} = 0, \ldots$ не имеет предела, ряд (13.2) расходится.

2. Рассмотрим ряд, составленный из элементов геометрической прогрессии:

$$1 + q + q^2 + \ldots + q^k + \ldots = \sum_{k=1}^{\infty} q^{k-1}, \tag{13.3}$$

n-я частичная сумма S_n этого ряда при $q \neq 1$ имеет вид

$$S_n = 1 + q + \ldots + q^{n-1} = \frac{1-q^n}{1-q} = \frac{1}{1-q} - \frac{q^n}{1-q}. \tag{13.4}$$

Очевидно, что при $|q| < 1$ последовательность частичных

---

[1]) В современной математике, наряду с указанным выше понятием суммы, вводится понятие суммы ряда в различных обобщенных смыслах. Это позволяет суммировать в обобщенных смыслах многие расходящиеся ряды (см. Дополнение 3 к этой главе).

сумм S_n сходится и имеет предел, равный $\frac{1}{1-q}$. Таким образом, при $|q| < 1$ рассматриваемый ряд сходится и имеет сумму, равную $\frac{1}{1-q}$.

При $|q| > 1$ из равенства (13.4) очевидно, что последовательность S_n (а стало быть, и рассматриваемый ряд) расходится. При $|q| = 1$ расходимость ряда (13.3) усматривается непосредственно. В самом деле, при $q = +1$ $S_n = n$, расходимость последовательности S_n очевидна, а при $q = -1$ ряд (13.3) переходит в изученный выше ряд (13.2).

3. Пусть x — любое фиксированное число. Докажем, что ряд

$$1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \ldots + \frac{x^k}{k!} + \ldots = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{x^{k-1}}{(k-1)!} \;{}^{1)} \tag{13.5}$$

сходится и имеет сумму, равную e^x.

В п. 2 § 15 гл. 8 мы получили разложение по формуле Маклорена функции e^x

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \ldots + \frac{x^{n-1}}{(n-1)!} + R_n(x), \tag{13.6}$$

где

$$R_n(x) = \frac{x^n}{n!} e^{\theta x} \quad (0 < \theta < 1). \tag{13.7}$$

Из формул (13.6) и (13.7) мы получим

$$\left| \left[1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \ldots + \frac{x^{n-1}}{(n-1)!} \right] - e^x \right| \leqslant \frac{|x|^n}{n!} e^{|x|}. \tag{13.8}$$

Обозначая через S_n n-ю частичную сумму ряда (13.5), мы можем переписать неравенство (13.8) в виде

$$|S_n - e^x| \leqslant \frac{|x^n|}{n!} e^{|x|}. \tag{13.9}$$

Поскольку при любом фиксированном x

$$\lim_{n \to \infty} \frac{|x^n|}{n!} = 0 \;{}^{2)},$$

то правая часть неравенства (13.9) представляет собой элемент бесконечно малой последовательности. Но это и означает, что последовательность $\{S_n\}$ *сходится к числу* e^x. Стало быть, и ряд (13.5) сходится и имеет сумму e^x.

---

[1]) Символом 0! мы обозначили число 1.

[2]) См. пример 3 из п. 3 § 3 гл. 3.

4. Совершенно аналогично, используя формулу Маклорена для функций $\sin x$ и $\cos x$, можно доказать, что ряды

$$x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \ldots = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1} x^{2k-1}}{(2k-1)!}$$

и

$$1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \ldots = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1} x^{2k-2}}{(2k-2)!}$$

при любом фиксированном значении x сходятся и имеют суммы соответственно равные $\sin x$ и $\cos x$. (Предоставляем читателю самому убедиться в этом.)

2. Критерий Коши сходимости ряда. Так как вопрос о сходимости ряда, по определению, эквивалентен вопросу о сходимости последовательности его частичных сумм, то мы получим необходимое и достаточное условие сходимости данного ряда, сформулировав критерий сходимости Коши для последовательности его частичных сумм. Ради удобства приведем формулировку критерия Коши для последовательности. *Для того чтобы последовательность $\{S_n\}$ была сходящейся, необходимо и достаточно, чтобы для любого положительного числа ε нашелся номер N такой, что для всех номеров n, удовлетворяющих условию $n \geqslant N$, и для всех натуральных p $(p = 1, 2, 3, \ldots)$*

$$|S_{n+p} - S_n| < \varepsilon.$$

В качестве следствия из этого утверждения мы получим следующую *основную* теорему.

Теорема 13.1 (критерий Коши для ряда). *Для того чтобы ряд $\sum\limits_{k=1}^{\infty} u_k$ сходился, необходимо и достаточно, чтобы для любого положительного числа ε нашелся номер N такой, что для всех номеров n, удовлетворяющих условию $n \geqslant N$ и для всех натуральных чисел p*

$$\left| \sum_{k=n+1}^{n+p} u_k \right| < \varepsilon. \tag{13.10}$$

Для доказательства этой теоремы достаточно заметить, что величина, стоящая под знаком модуля в неравенстве (13.10), равна разности частичных сумм $S_{n+p} - S_n$. Подчеркнем, что критерий сходимости Коши представляет в основном теоретический интерес. Его использование для практических потребностей установления сходимости или расходимости тех или иных конкретных

рядов, как правило, сопряжено с трудностями. Поэтому наличие критерия Коши не снимает вопроса об установлении других практически эффективных признаков сходимости и расходимости рядов.

Из теоремы 13.1 легко извлечь два элементарных, но важных следствия.

Следствие 1. *Если ряд* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} u_k$ *сходится, то последовательность* $r_n = \sum\limits_{k=n+1}^{\infty} u_k$ *является бесконечно малой.*

Принято называть величину r_n *n-м остатком ряда* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} u_k$. Чтобы доказать следствие 1, достаточно доказать, что для любого $\varepsilon > 0$ найдется номер N такой, что $|r_n| \leqslant \varepsilon$ при $n \geqslant N$. Последнее неравенство непосредственно вытекает из неравенства (13.10), справедливого для *любого* $p = 1, 2, 3, \ldots$, и из теоремы 3.13.

Следствие 2 (необходимое условие сходимости ряда). *Для сходимости ряда* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} u_k$ *необходимо, чтобы последовательность* $u_1, u_2, u_3, \ldots$ *членов этого ряда являлась бесконечно малой.*

Достаточно доказать, что для данного сходящегося ряда и для любого $\varepsilon > 0$ найдется номер N_0 такой, что при $n \geqslant N_0$ $|u_n| < \varepsilon$. Пусть дано любое $\varepsilon > 0$. Согласно теореме 13.1 найдется номер N такой, что при $n \geqslant N$ и для *любого* натурального p выполняется неравенство (13.10). В частности, при $p = 1$ это неравенство имеет вид

$$|u_{n+1}| < \varepsilon \quad (\text{при } n \geqslant N). \tag{13.11}$$

Если теперь положить номер N_0 равным $N_0 = N + 1$, то при $n \geqslant N_0$ в силу неравенства (13.11) получим $|u_n| < \varepsilon$, что и требовалось доказать.

По другому следствие 2 можно сформулировать так: *для сходимости ряда* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} u_k$ *необходимо, чтобы* $\lim\limits_{k\to\infty} u_k = 0$. Таким образом, при исследовании на сходимость данного ряда следует прежде всего посмотреть, стремится ли к нулю k-й член этого ряда при $k \to \infty$. Если это не так, то ряд заведомо расходится. Так, например, ряд

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{k^2}{5k^2 + 300k}$$

заведомо расходится, ибо

$$\lim_{k\to\infty} u_k = \lim_{k\to\infty} \frac{k^2}{5k^2+300k} = \frac{1}{5} \neq 0.$$

Аналогично расходимость уже изученного выше ряда $\sum\limits_{k=1}^{\infty}(-1)^{k-1}$ вытекает из того, что $\lim\limits_{k\to\infty}(-1)^k$ не существует.

Подчеркнем, однако, что стремление к нулю k-го члена ряда при $k \to \infty$ является *лишь необходимым, но не достаточным условием сходимости ряда.*

В качестве примера рассмотрим ряд

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \ldots \tag{13.12}$$

Этот ряд обычно называют *гармоническим рядом.* Очевидно, что для гармонического ряда выполнено необходимое условие сходимости, ибо $\lim\limits_{k\to\infty} \dfrac{1}{k} = 0$. Докажем, однако, что этот ряд расходится. Воспользуемся критерием Коши. Докажем, что для положительного числа $\varepsilon = 1/2$ *не существует такого номера* N, что при $n \geqslant N$ для любого натурального p

$$\left|\sum_{k=n+1}^{n+p} \frac{1}{k}\right| < \varepsilon = \frac{1}{2}. \tag{13.13}$$

В самом деле, если взять $p = n$, то *для сколь угодно большого* n

$$\sum_{k=n+1}^{n+p} \frac{1}{k} = \sum_{k=n+1}^{2n} \frac{1}{k} \geqslant \frac{1}{2n} n = \frac{1}{2}.$$

(Мы учли, что в последней сумме n слагаемых и что наименьшее из этих слагаемых равно $1/2n$.)

Итак, неравенство (13.13) оказывается невыполненным, каким бы большим мы ни взяли номер N. В силу критерия Коши ряд (13.12) расходится.

3. Два свойства, связанные со сходимостью ряда. 1°. *Отбрасывание конечного числа членов ряда (или добавление к ряду конечного числа членов) не влияет на сходимость или расходимость этого ряда.*

Чтобы убедиться в этом, достаточно заметить, что в результате указанного отбрасывания (или добавления) членов, все частичные суммы этого ряда, начиная с некоторого номера, изменятся на одну и ту же постоянную величину.

2°. *Если c — отличная от нуля постоянная, $u'_k = cu_k$, то ряд $\sum\limits_{k=1}^{\infty} u'_k$ сходится тогда и только тогда, когда сходится ряд $\sum\limits_{k=1}^{\infty} u_k$.*

Если обозначить n-е частичные суммы рассматриваемых рядов соответственно через S'_n и S_n, то очевидно, что $S'_n = cS_n$. Из последнего равенства вытекает, что $\lim\limits_{n\to\infty} S'_n$ существует тогда и только тогда, когда существует $\lim\limits_{n\to\infty} S_n$.

§ 2. Ряды с положительными членами

1. Необходимое и достаточное условие сходимости ряда с положительными членами. В этом параграфе мы рассмотрим ряды, *все члены которых неотрицательны*. Следуя установившейся традиции, мы будем называть такие ряды *рядами с положительными членами* (хотя правильнее было бы употреблять термин «ряды с неотрицательными членами»). Что же касается рядов, все члены которых строго больше нуля, то такие ряды мы будем называть *рядами со строго положительными членами*.

Ряды с положительными членами сами по себе часто встречаются в приложениях. Кроме того, их предварительное изучение облегчит изучение рядов с членами любого знака. В дальнейшем, чтобы подчеркнуть, что речь идет о ряде с положительными членами, мы часто будем обозначать члены такого ряда символом p_k вместо u_k.

Мы можем сразу же отметить основное характеристическое свойство ряда с положительными членами: *последовательность частичных сумм такого ряда является неубывающей.*

Это позволяет нам доказать следующее утверждение.

Теорема 13.2. *Для того чтобы ряд с положительными членами сходился, необходимо и достаточно, чтобы последовательность частичных сумм этого ряда была ограничена.*

Необходимость следует из того, что всякая сходящаяся последовательность является ограниченной (в силу теоремы 3.8).

Достаточность вытекает из того, что последовательность частичных сумм не убывает и, стало быть, для сходимости этой последовательности достаточно, чтобы она была ограничена (в силу теоремы 3.15).

2. Признаки сравнения. В этом пункте мы установим ряд признаков, позволяющих сделать заключение о сходимости (или расходимости) рассматриваемого ряда *посредством сравнения*

его с другим рядом, сходимость (или расходимость) которого известна.

Теорема 13.3. *Пусть* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$ *и* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p'_k$ *— два ряда с положительными членами. Пусть, далее, для всех номеров k справедливо неравенство*

$$p_k \leqslant p'_k. \tag{13.14}$$

Тогда сходимость ряда $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p'_k$ *влечет за собой сходимость ряда* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$*; расходимость ряда* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$ *влечет за собой расходимость ряда* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p'_k$.

Доказательство. Обозначим n-е частичные суммы рядов $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$ и $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p'_k$ соответственно через S_n и S'_n. Из неравенства (13.14) заключаем, что $S_n \leqslant S'_n$. Последнее неравенство означает, что ограниченность последовательности частичных сумм $\{S'_n\}$ влечет за собой ограниченность последовательности частичных сумм $\{S_n\}$ и, наоборот, неограниченность последовательности частичных сумм $\{S_n\}$ влечет за собой неограниченность последовательности частичных сумм $\{S'_n\}$. В силу теоремы 13.2 теорема 13.3 доказана.

Замечание 1. В условии теоремы 13.3 можно требовать, чтобы неравенство (13.14) было выполнено не для всех номеров k, а лишь *начиная с некоторого номера* k. В самом деле, в силу п. 3 § 1, отбрасывание конечного числа членов не влияет на сходимость ряда.

Замечание 2. *Теорема* 13.3 *останется справедливой, если в условии этой теоремы заменить неравенство* (13.14) *следующим неравенством*:

$$p_k \leqslant c p'_k, \tag{13.15}$$

где c — любая положительная постоянная. В самом деле, в силу п. 3 § 1, вопрос о сходимости ряда $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p'_k$ эквивалентен вопросу о сходимости ряда $\sum\limits_{k=1}^{\infty} (c p'_k)$. При этом, конечно, можно требовать, чтобы неравенство (13.15) было выполнено, лишь начиная с некоторого достаточно большого номера k.

Следствие из теоремы 13.3. *Если* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$ *— ряд с положительными членами,* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p'_k$ *— ряд со строго положительными членами и если существует конечный предел*

$$\lim_{k\to\infty} \frac{p_k}{p'_k} + L,$$

то сходимость ряда $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p'_k$ *влечет за собой сходимость ряда* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$*; расходимость ряда* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$ *влечет за собой расходимость ряда* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p'_k$.

Доказательство. Так как $\lim\limits_{k\to\infty} \frac{p_k}{p'_k} = L$, то, по определению предела, для некоторого $\varepsilon > 0$ найдется номер N такой, что при $k \geqslant N$

$$L - \varepsilon < \frac{p_k}{p'_k} < L + \varepsilon.$$

Стало быть, при $k \geqslant N$ справедливо неравенство $p_k < (L+\varepsilon)p'_k$. Последнее неравенство совпадает с неравенством (13.15) при $c = L + \varepsilon$. В силу замечания 2 к теореме 13.3 следствие доказано.

Теорема 13.4. *Пусть* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$ *и* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p'_k$ *— два ряда со строго положительными членами. Пусть, далее, для всех номеров* k *справедливо неравенство*

$$\frac{p_{k+1}}{p_k} \leqslant \frac{p'_{k+1}}{p'_k}. \tag{13.16}$$

Тогда сходимость ряда $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p'_k$ *влечет за собой сходимость ряда* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$*; расходимость ряда* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$ *влечет за собой расходимость ряда* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p'_k$.

Доказательство. Запишем неравенство (13.16) для $k = 1, 2, \ldots, n-1$, где n — *любой* номер. Будем иметь

$$\frac{p_2}{p_1} \leqslant \frac{p'_2}{p'_1}, \quad \frac{p_3}{p_2} \leqslant \frac{p'_3}{p'_2}, \quad \ldots\ldots\ldots \quad \frac{p_n}{p_{n-1}} \leqslant \frac{p'_n}{p'_{n-1}}.$$

Перемножая почленно все написанные неравенства, получим

$$\frac{p_n}{p_1} \leqslant \frac{p'_n}{p'_1} \quad \text{или} \quad p_n \leqslant \frac{p_1}{p'_1} p'_n.$$

Поскольку в последнем неравенстве величина $c = p_1/p'_1$ представляет собой *положительную постоянную, не зависящую от номера* n, то, в силу замечания 2 к теореме 13.3, теорема 13.4 доказана.

Замечание 3. В условии теоремы 13.4 можно требовать, чтобы неравенство (13.16) было выполнено не для всех номеров k, а лишь *начиная с некоторого номера* k (ибо отбрасывание конечного числа первых членов не влияет на сходимость ряда).

Обе доказанные в настоящем пункте теоремы называют *теоремами сравнения* или *признаками сравнения*.

Приведем примеры применения признаков сравнения.

1. Исследуем вопрос о сходимости ряда

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{3 + b^k}, \quad \text{где} \quad b > 0.$$

Если $b \leqslant 1$, то k-й член рассматриваемого ряда не стремится к нулю при $k \to \infty$. Стало быть, нарушено необходимое условие сходимости ряда и ряд *расходится*. Если же $b > 1$, то, поскольку для любого номера k справедливо неравенство

$$\frac{1}{3 + b^k} < \frac{1}{b^k}$$

и поскольку ряд $\sum\limits_{k=1}^{\infty} \frac{1}{b^k}$ сходится, теорема сравнения 13.3 позволяет утверждать сходимость рассматриваемого ряда.

2. Исследуем вопрос о сходимости для любого $\alpha \leqslant 1$ следующего ряда:

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^\alpha} = 1 + \frac{1}{2^\alpha} + \ldots + \frac{1}{k^\alpha} + \ldots \tag{13.17}$$

Этот ряд часто называют *обобщенным гармоническим рядом*. Поскольку при $\alpha \leqslant 1$ для любого номера k справедливо неравенство

$$\frac{1}{k^\alpha} \geqslant \frac{1}{k}$$

и поскольку гармонический ряд $\sum\limits_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k}$ расходится [1]), то теорема сравнения 13.3 позволяет утверждать расходимость ряда (13.17) для любого $\alpha \leqslant 1$.

---

[1]) Расходимость гармонического ряда установлена в п. 2 § 1.

3. Признаки Даламбера и Коши. К признакам сравнения непосредственно примыкают два весьма употребительных признака сходимости рядов с положительными членами — Даламбера и Коши. Признаки Даламбера и Коши основаны на сравнении рассматриваемого ряда с рядом, составленным из элементов геометрической прогрессии, а именно со сходящимся рядом

$$\sum_{k=1}^{\infty} q^k = q + q^2 + q^3 + \ldots, \qquad |q| < 1, \tag{13.18}$$

или с расходящимся рядом

$$\sum_{k=1}^{\infty} 1 = 1 + 1 + 1 + \ldots \tag{13.19}$$

Теорема 13.5 (признак Даламбера) [1]. I. *Если для всех номеров k, или по крайней мере начиная с некоторого номера k, справедливо неравенство*

$$\frac{p_{k+1}}{p_k} \leqslant q < 1 \ ^{2)} \qquad \left(\frac{p_{k+1}}{p_k} \geqslant 1\right), \tag{13.20}$$

то ряд $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$ сходится (расходится).

II. *Если существует предел*

$$\lim_{k\to\infty} \frac{p_{k+1}}{p_k} = L, \tag{13.21}$$

то ряд $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$ сходится при $L < 1$ и расходится при $L > 1$.

Теорему II обычно называют *признаком Даламбера в предельной форме.* В этой форме он наиболее часто используется.

Доказательство. Разберем отдельно теоремы I и II.

1) Для доказательства теоремы I положим $p'_k = q^k$ $(p'_k = 1)$. Тогда $\dfrac{p'_{k+1}}{p'_k} = q$, где $q < 1$ $\left(\dfrac{p'_{k+1}}{p'_k} = 1\right)$, и мы можем переписать неравенство (13.20) в виде

$$\frac{p_{k+1}}{p_k} \leqslant \frac{p'_{k+1}}{p'_k} \qquad \left(\frac{p_{k+1}}{p_k} \geqslant \frac{p'_{k+1}}{p'_k}\right). \tag{13.22}$$

---

[1]) Жак Лерон Даламбер — французский математик и философ (1717–1783).

[2]) При этом, конечно, предполагается, что все члены ряда $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$ (по крайней мере начиная с некоторого номера) *строго* положительны.

Так как ряд $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p'_k$, совпадающий с рядом (13.18) ((13.19)), сходится (расходится), то неравенство (13.22) на основании теоремы сравнения 13.4 гарантирует сходимость (расходимость) ряда $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$. Теорема I доказана.

2) Докажем теперь теорему II. Если $L < 1$, то найдется *положительное* число ε такое, что $L = 1 - 2\varepsilon$ и $L + \varepsilon = 1 - \varepsilon$. По определению предела последовательности для указанного ε найдется номер N такой, что при $k \geqslant N$

$$L - \varepsilon < \frac{p_{k+1}}{p_k} < L + \varepsilon = 1 - \varepsilon. \tag{13.23}$$

Число $L + \varepsilon = 1 - \varepsilon$ играет роль q в теореме I. Ряд сходится.

Если же $L > 1$, то найдется *положительное* число ε такое, что $L = 1 + \varepsilon$ и $L - \varepsilon = 1$. В этом случае на основании левого из неравенств (13.23) получим

$$\frac{p_{k+1}}{p_k} > L - \varepsilon = 1 \quad (\text{при } k \geqslant N).$$

Ряд расходится на основании теоремы I. Теорема 13.5 полностью доказана.

Замечания к теореме 13.5. 1) Обратим внимание на то, что в теореме 13.5 (I) неравенство $\frac{p_{k+1}}{p_k} \leqslant q < 1$ (для всех k, начиная с некоторого) *нельзя заменить* на $\frac{p_{k+1}}{p_k} < 1$.

В самом деле, как доказано выше, гармонический ряд (13.12) расходится, но для этого ряда $\frac{p_{k+1}}{p_k} = \frac{k}{k+1} < 1$ (для всех номеров k).

2) Если в условиях теоремы 13.5 (II) $L = 1$, то нельзя сказать ничего определенного о сходимости ряда (т. е. при $L = 1$ признак Даламбера «не действует»). В самом деле, для гармонического ряда (13.12) $L = 1$, причем этот ряд, как мы знаем, расходится. Вместе с тем для ряда

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \tag{13.24}$$

также $L = 1$, но этот ряд, как будет показано в следующем пункте, сходится.

***Теорема 13.6* (*признак Коши*).** I. *Если для всех номеров k, или по крайней мере начиная с некоторого номера k, справедливо неравенство*

$$\sqrt[k]{p_k} \leqslant q < 1 \qquad \left(\sqrt[k]{p_k} \geqslant 1\right), \tag{13.25}$$

то ряд $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$ сходится (расходится).

II. *Если существует предел*

$$\lim_{k\to\infty} \sqrt[k]{p_k} = L, \tag{13.26}$$

то ряд $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$ *сходится при* $L < 1$ *и расходится при* $L > 1$.

Теорему II обычно называют *признаком Коши в предельной форме.*

Доказательство. Разберем отдельно теоремы I и II.

1) Для доказательства теоремы I положим $p'_k = q^k$ $(p'_k = 1)$. Тогда из неравенства (13.25) получим

$$p_k \leqslant p'_k \qquad (p_k \geqslant p'_k). \tag{13.27}$$

Так как ряд $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p'_k$, совпадающий с рядом (13.18) ((13.19)), сходится (расходится), то неравенство (13.27) на основании теоремы сравнения 13.3 гарантирует сходимость (расходимость) ряда $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$.

Теорема 13.6 (I) доказана.

2) Для доказательства теоремы 13.6 (II) следует дословно повторить схему доказательства теоремы 13.5 (II), заменив во всех рассуждениях $\frac{p_{k+1}}{p_k}$ на $\sqrt[k]{p_k}$.

Теорема 13.6 полностью доказана.

Замечания к теореме 13.6. 1) Как и в предыдущей теореме, в теореме 13.6 (I) неравенство $\sqrt[k]{p_k} \leqslant q < 1$ нельзя заменить на $\sqrt[k]{p_k} < 1$.

2) При $L = 1$ признак Коши в предельной форме «не действует». Можно сослаться на два примера, указанные в соответствующем замечании к признаку Даламбера.

3) Возникает вопрос о том, какой из двух признаков, Даламбера или Коши, является более сильным. Проанализируем этот вопрос в отношении признаков Даламбера и Коши, взятых *в предельной форме.* Можно доказать, что *из существования предела* (13.21) *вытекает существование предела* (13.26) *и факт равенства этих пределов.* (Доказательство приведено в дополнении I к этой главе.) Обратное неверно. В самом деле, легко убедиться в том, что для ряда

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k + 3}{2^{k+1}} \tag{13.28}$$

предел (13.26) существует и равен 1/2, в то время как предел (13.21) вообще не существует. Таким образом, признак Коши является более сильным, чем признак Даламбера, ибо всякий раз, когда действует признак Даламбера, действует и признак Коши и вместе с тем существуют ряды (например, ряд

(13.28)), для которых действует признак Коши и не действует признак Даламбера. Несмотря на это, признак Даламбера на практике употребляется чаще, чем признак Коши.

Примеры. 1) Исследуем вопрос о сходимости ряда

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\sqrt{k})^k}{k!}. \tag{13.29}$$

Применим признак Даламбера в предельной форме. Имеем

$$p_k = \frac{(\sqrt{k})^k}{k!}, \quad \frac{p_{k+1}}{p_k} = \frac{(\sqrt{k+1})^{k+1}}{(k+1)!} \frac{k!}{(\sqrt{k})^k} = \frac{1}{\sqrt{k+1}} \left(1 + \frac{1}{k}\right)^{k/2}. \tag{13.30}$$

На основании (13.30)

$$\lim_{k\to\infty} \frac{p_{k+1}}{p_k} = \lim_{k\to\infty} \frac{1}{\sqrt{k+1}} \left(1 + \frac{1}{k}\right)^{k/2} =$$

$$= \lim_{k\to\infty} \frac{1}{\sqrt{k+1}} \lim_{k\to\infty} \left(1 + \frac{1}{k}\right)^{k/2} = 0 \cdot \sqrt{e} = 0 < 1,$$

т. е. ряд (13.29) сходится.

2) Изучим вопрос о сходимости ряда

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{k}{2^k}. \tag{13.31}$$

Применим признак Коши в предельной форме. Имеем

$$\sqrt[k]{p_k} = \frac{\sqrt[k]{k}}{2}. \tag{13.32}$$

На основании (13.32) $\lim\limits_{k\to\infty} \sqrt[k]{p_k} = \frac{1}{2} \lim\limits_{k\to\infty} \sqrt[k]{k} = \frac{1}{2} < 1$ [1]. Таким образом, признак Коши устанавливает сходимость ряда (13.31).

4. Интегральный признак Коши–Маклорена. Признаки Даламбера и Коши оказываются непригодными для выяснения вопроса о сходимости некоторых часто встречающихся рядов с положительными членами. Так, например, с помощью этих признаков нельзя выяснить вопрос о сходимости обобщенного гармонического ряда

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^\alpha} \tag{13.33}$$

(α — любое вещественное число).

---

[1]) Для вычисления $\lim\limits_{x\to+\infty} x^{1/x}$ следует прологарифмировать выражение $x^{1/x}$ и применить правило Лопиталя.

Правда, в конце п. 2 мы установили, что при $\alpha \leqslant 1$ ряд (13.33) расходится, но остается открытым вопрос о сходимости этого ряда при $\alpha > 1$. В этом пункте мы установим еще один общий признак сходимости ряда с положительными членами, из которого, в частности, будет вытекать сходимость ряда (13.33) при $\alpha > 1$.

***Теорема 13.7* (*теорема Коши–Маклорена*).** *Пусть функция $f(x)$ неотрицательна и не возрастает всюду на полупрямой $x \geqslant m$, где m — любой фиксированный номер. Тогда числовой ряд*

$$\sum_{k=m}^{\infty} f(k) = f(m) + f(m+1) + f(m+2) + \ldots \tag{13.34}$$

сходится в том и только в том случае, когда существует предел при $n \to \infty$ последовательности

$$a_n = \int_m^n f(x)\,dx. \tag{13.35}$$

Доказательство. Пусть k — любой номер, удовлетворяющий условию $k \geqslant m+1$, а x — любое значение аргумента из сегмента $k-1 \leqslant x \leqslant k$. Так как по условию функция $f(x)$ не возрастает на указанном сегменте, то для всех x из указанного сегмента справедливы неравенства

$$f(k) \leqslant f(x) \leqslant f(k-1). \tag{13.36}$$

Функция $f(x)$, будучи ограниченной и монотонной, интегрируема на сегменте $k-1 \leqslant x \leqslant k$ (см. п. 5 § 4 гл. 10). Более того, из неравенств (13.36) и из свойства 3° (см. п. 1 § 6 гл. 10) вытекает, что

$$\int_{k-1}^{k} f(k)\,dx \leqslant \int_{k-1}^{k} f(x)\,dx \leqslant \int_{k-1}^{k} f(k-1)\,dx$$

или

$$f(k) \leqslant \int_{k-1}^{k} f(x)\,dx \leqslant f(k-1). \tag{13.37}$$

Неравенства (13.37) установлены нами для любого $k \geqslant m+1$. Запишем эти неравенства для значений $k = m+1, m+2, \ldots, n$,

где n — любой номер, превосходящий m:

$$f(m+1) \leqslant \int\limits_{m}^{m+1} f(x)\,dx \leqslant f(m),$$

$$f(m+2) \leqslant \int\limits_{m+1}^{m+2} f(x)\,dx \leqslant f(m+1),$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$f(n) \leqslant \int\limits_{n-1}^{n} f(x)\,dx \leqslant f(n-1).$$

Складывая почленно записанные неравенства, получим

$$\sum_{k=m+1}^{n} f(k) \leqslant \int\limits_{m}^{n} f(x)\,dx \leqslant \sum_{k=m}^{n-1} f(k). \tag{13.38}$$

Договоримся обозначать символом S_n n-ю сумму ряда (13.34), равную

$$S_n = \sum_{k=m}^{n} f(k).$$

Приняв это обозначение и учитывая обозначение (13.35), мы можем следующим образом переписать неравенства (13.38):

$$S_n - f(m) \leqslant a_n \leqslant S_{n-1}. \tag{13.39}$$

Неравенства (13.39) позволяют без труда доказать теорему. В самом деле, из формулы (13.35) очевидно, что последовательность $\{a_n\}$ является неубывающей. Стало быть, для сходимости этой последовательности необходима и достаточна ее ограниченность. Для сходимости ряда (13.34) в силу теоремы 13.2 необходима и достаточна ограниченность последовательности $\{S_n\}$. Из неравенств (13.39) вытекает, что последовательность $\{S_n\}$ ограничена тогда и только тогда, когда ограничена последовательность $\{a_n\}$, т. е. тогда и только тогда, когда последовательность $\{a_n\}$ сходится. Теорема доказана.

Примеры. 1) Прежде всего применим интегральный признак Коши–Маклорена для выяснения сходимости обобщенного гармонического ряда (13.33). Поскольку ряд (13.33) можно рассматривать как ряд вида (13.34) при $m = 1$, $f(x) = \dfrac{1}{x^\alpha}$ и функция $f(x)$ убывает и положительна на полупрямой $x \geqslant 1$,

вопрос о сходимости ряда (13.33) эквивалентен вопросу о сходимости последовательности $\{a_n\}$, где

$$a_n = \int\limits_1^n \frac{1}{x^\alpha}\,dx = \begin{cases} \left.\dfrac{x^{1-\alpha}}{1-\alpha}\right|_{x=1}^{x=n} = \dfrac{n^{1-\alpha}-1}{1-\alpha} & \text{при } \alpha \neq 1, \\ \left.\ln x\right|_{x=1}^{x=n} = \ln n & \text{при } \alpha = 1. \end{cases}$$

Из вида элементов a_n вытекает, что последовательность $\{a_n\}$ расходится при $\alpha \leqslant 1$ и сходится при $\alpha > 1$, причем в последнем случае $\lim\limits_{n\to\infty} a_n = \dfrac{1}{\alpha - 1}$. Таким образом, *ряд* (13.33) *расходится при* $\alpha \leqslant 1$ (это мы уже установили выше другим способом) *и сходится при* $\alpha > 1$. В частности, при $\alpha = 2$ ряд (13.33) переходит в ряд (13.24), сходимость которого мы теперь можем утверждать.

2) Исследуем вопрос о сходимости ряда

$$\sum_{k=2}^{\infty} \frac{1}{k \ln^\beta k}, \tag{13.40}$$

где β — фиксированное положительное вещественное число. Ряд (13.40) можно рассматривать как ряд вида (13.34) при $m = 2$ и $f(x) = \dfrac{1}{x \ln^\beta x}$. Поскольку функция $f(x)$ неотрицательна и не возрастает на полупрямой $x \geqslant 2$, вопрос о сходимости ряда (13.40) эквивалентен вопросу о сходимости последовательности $\{a_n\}$, где

$$a_n = \int\limits_2^n \frac{1}{x \ln^\beta x}\,dx = \begin{cases} \left.\dfrac{\ln^{1-\beta} x}{1-\beta}\right|_{x=2}^{x=n} = \dfrac{\ln^{1-\beta} n - \ln^{1-\beta} 2}{1-\beta} & \text{при } \beta \neq 1, \\ \left.\ln\ln x\right|_{x=2}^{x=n} = \ln\ln n - \ln\ln 2 & \text{при } \beta = 1. \end{cases}$$

Из вида элементов a_n вытекает, что последовательность $\{a_n\}$ сходится при $\beta > 1$ и расходится при $\beta \leqslant 1$. Таким образом, ряд (13.40) *сходится при* $\beta > 1$ *и расходится при* $\beta \leqslant 1$.

5. Признак Раабе. Признаки Даламбера и Коши были основаны на сравнении рассматриваемого ряда с рядом, представляющим собой сумму геометрической прогрессии. Естественно, возникает идея о получении более тонких признаков, основанных на сравнении рассматриваемого ряда с другими стандартными рядами, сходящимися или расходящимися «медленнее», чем ряд для геометрической прогрессии.

В этом пункте мы установим признак, основанный на сравнении рассматриваемого ряда с изученным в предыдущем пункте стандартным рядом

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^\alpha} = 1 + \frac{1}{2^\alpha} + \frac{1}{3^\alpha} + \ldots \tag{13.41}$$

Теорема 13.8 (признак Раабе) [1]**.** I. *Если для всех номеров k, или по крайней мере начиная с некоторого номера k, справедливо неравенство* [2]

$$k\left(1-\frac{p_{k+1}}{p_k}\right) \geqslant q > 1 \qquad \left\{k\left(1-\frac{p_{k+1}}{p_k}\right) \leqslant 1\right\}, \tag{13.42}$$

то ряд $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$ *сходится (расходится).*

II. *Если существует предел*

$$\lim_{k\to\infty}\left(1-\frac{p_{k+1}}{p_k}\right) = L, \tag{13.43}$$

то ряд $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$ *сходится при $L > 1$ и расходится при $L < 1$.* Теорему II обычно называют признаком Раабе *в предельной форме.*

Доказательство. Разберем отдельно теоремы I и II.

1) Для доказательства теоремы I перепишем неравенство (13.42) в виде

$$\frac{p_{k+1}}{p_k} \leqslant 1-\frac{q}{k} \qquad \left\{\frac{p_{k+1}}{p_k} \geqslant 1-\frac{1}{k}\right\}. \tag{13.44}$$

Так как $q > 1$, то найдется некоторое число α, удовлетворяющее неравенствам $q > \alpha > 1$. Разложив функцию $(1+x)^\alpha$ по формуле Маклорена с остаточным членом в форме Пеано (см. п. 2 § 15 гл. 8), будем иметь

$$(1+x)^\alpha = 1+\alpha x + g(x).$$

Полагая в последней формуле $x = -1/k$, получим

$$\left(1-\frac{1}{k}\right)^\alpha = 1-\frac{\alpha}{k}+g\left(\frac{1}{k}\right). \tag{13.45}$$

Поскольку последовательность $\dfrac{g(1/k)}{1/k}$ является бесконечно малой, то начиная с некоторого номера k_0, справедливо неравенство

$$\frac{g(1/k)}{1/k} \leqslant q-\alpha. \tag{13.46}$$

Сопоставляя (13.45) и (13.46), получим неравенство

$$\left(1-\frac{1}{k}\right)^\alpha \geqslant 1-\frac{q}{k} \qquad (\text{при } k \geqslant k_0). \tag{13.47}$$

Сравнение неравенств (13.44) и (13.47) дает

$$\frac{p_{k+1}}{p_k} \leqslant \left(1-\frac{1}{k}\right)^\alpha \left\{\frac{p_{k+1}}{p_k} \geqslant 1-\frac{1}{k}\right\} \qquad (\text{при } k \geqslant k_0).$$

---

[1] Иозеф Людвиг Раабе — швейцарский математик (1801–1859).

[2] Конечно, при этом предполагается, что ряд $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$, по крайней мере начиная с некоторого номера, имеет *строго положительные члены.*

Последние неравенства можно переписать в виде

$$\frac{p_{k+1}}{p_k} \leqslant \frac{\dfrac{1}{k^\alpha}}{\dfrac{1}{(k-1)^\alpha}} \quad \left\{ \frac{p_{k+1}}{p_k} \geqslant \frac{\dfrac{1}{k}}{\dfrac{1}{k-1}} \right\} \qquad (\text{при } k \geqslant k_0). \tag{13.48}$$

Поскольку ряд (13.41) сходится при $\alpha > 1$ и расходится при $\alpha = 1$, то неравенства (13.48) и теорема сравнения 13.4 позволяют утверждать, что ряд $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$ сходится (расходится). Теорема I доказана.

2) Точно так же, как и в признаках Даламбера и Коши, мы сведем теорему II к теореме I. Пусть сначала $L > 1$. Положим $\varepsilon = \dfrac{L-1}{2}$, $q = 1 + \varepsilon = L - \varepsilon$. По определению предела (13.43) для этого ε можно указать номер k_0, начиная с которого $\left| k\left(1 - \dfrac{p_{k+1}}{p_k}\right) - L \right| < \varepsilon$, и, стало быть, справедливо левое неравенство (13.42). Если же $L < 1$, то мы положим $\varepsilon = 1 - L$ и, используя определение предела (13.43), получим, что, начиная с некоторого номера k_0, справедливо правое неравенство (13.42). Теорема 13.8 полностью доказана.

З а м е ч а н и е. Отметим, что в теореме 13.8 (I) в левом неравенстве (13.42) нельзя взять $q = 1$ (при этом сходимость ряда может не иметь места). При $L = 1$ теорема 13.8 (II) «не действует» (возможна и сходимость, и расходимость ряда).

П р и м е р. Исследовать вопрос о сходимости ряда

$$\sum_{k=2}^{\infty} p_k, \quad \text{где} \quad p_k = a^{-\left(1+\frac{1}{2}+\frac{1}{3}+\ldots+\frac{1}{k-1}\right)} \qquad (a = \text{const} > 0).$$

Легко проверить, что признаки Даламбера и Коши в применении к этому ряду «не действуют». Применим признак Раабе. Легко проверить, что

$$k\left(1 - \frac{p_{k+1}}{p_k}\right) = \frac{a^{-1/k} - 1}{\left(-\dfrac{1}{k}\right)}.$$

Нетрудно сообразить, что последняя дробь при $k \to \infty$ стремится к производной функции a^x в точке $x = 0$, т. е. стремится к $\ln a$. В силу признака Раабе рассматриваемый ряд *сходится при* $\ln a > 1$, *т. е. при* $a > e$, *и расходится при* $\ln a < 1$, *т. е. при* $a < e$. При $a = e$ вопрос о сходимости ряда требует дополнительного исследования, так как признак Раабе «не действует». Другим примером ряда, в применении к которому «не действует» признак Раабе, может служить ряд (13.40).

6. Отсутствие универсального ряда сравнения. Мы уже отмечали, что признаки Даламбера и Коши основаны на сравнениях рассматриваемого ряда с рядом для геометрической прогрессии, а признак Раабе — на сравнении с более медленно сходящимся (или расходящимся) рядом (13.41).

Естественно, возникает вопрос о том, *не существует ли такой универсальный (предельно медленно!) сходящийся (или расходящийся) ряд, сравнение с которым позволило бы сделать заключение о сходимости (или расходимости) любого наперед взятого ряда с положительными членами.*

Докажем, что такого универсального ряда *не существует.* Пусть даны два сходящихся ряда $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$ и $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p'_k$; обозначим символами r_n и r'_n соответственно их n-е остатки. Будем говорить, *что ряд* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p'_k$ *сходится медленнее, чем ряд* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$, *если* $\lim\limits_{n\to 0} \frac{r_n}{r'_n} = 0$. Докажем, *что для каждого сходящегося ряда существует ряд, сходящийся медленнее этого ряда.* В самом деле, пусть $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$ — любой сходящийся ряд; r_n — его n-й остаток. Докажем, что ряд $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p'_k$, где [1] $p'_k = \sqrt{r_{k-1}} - \sqrt{r_k}$, сходится медленнее, чем ряд $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$. В самом деле, если r'_n — n-й остаток ряда $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p'_k$, то

$$\lim_{n\to\infty} \frac{r_n}{r'_n} = \lim_{n\to\infty} \frac{r_n}{\sqrt{r_n}} = 0.$$

Докажем теперь отсутствие универсального сходящегося ряда, сравнение с которым позволило бы сделать заключение о сходимости любого наперед взятого сходящегося ряда. В самом деле, если бы такой универсальный сходящийся ряд $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$ существовал, то, взяв для него построенный выше ряд $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p'_k$, мы получили бы, что

$$\lim_{k\to\infty} \frac{p_k}{p'_k} = \lim_{k\to\infty} \frac{r_{k-1} - r_k}{\sqrt{r_{k-1}} - \sqrt{r_k}} = \lim_{k\to\infty} (\sqrt{r_{k-1}} + \sqrt{r_k}) = 0.$$

Таким образом, *из сравнения с рядом* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$ *нельзя сделать заключения о сходимости ряда* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p'_k$. Аналогично доказывается отсутствие универсального расходящегося ряда, сравнение с которым позволило бы сделать заключение о расходимости любого наперед взятого расходящегося ряда.

§ 3. Абсолютно и условно сходящиеся ряды

1. Понятия абсолютно и условно сходящегося ряда. Теперь мы перейдем к изучению рядов, члены которых являются вещественными числами любого знака.

Определение 1. *Будем называть ряд*

$$\sum_{k=1}^{\infty} u_k \tag{13.49}$$

[1] За r_0 принимаем всю сумму $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$.

абсолютно сходящимся, если сходится ряд

$$\sum_{k=1}^{\infty} |u_k|. \tag{13.50}$$

Заметим, что в этом определении ничего не сказано о том, предполагается ли при этом сходимость самого ряда (13.49). Оказывается, такое предположение оказалось бы излишним, ибо справедлива следующая теорема.

Теорема 13.9. *Из сходимости ряда* (13.50) *вытекает сходимость ряда* (13.49).

Доказательство. Воспользуемся критерием Коши для ряда (т. е. теоремой 13.1). Требуется доказать, что для любого $\varepsilon > 0$ найдется номер N такой, что для всех номеров n, удовлетворяющих условию $n \geqslant N$, и для любого натурального p

$$\left| \sum_{k=n+1}^{n+p} u_k \right| < \varepsilon. \tag{13.51}$$

Фиксируем любое $\varepsilon > 0$. Так как ряд (13.50) сходится, то, в силу теоремы 13.1, найдется номер N такой, что для всех номеров n, удовлетворяющих условию $n \geqslant N$, и для любого натурального p

$$\sum_{k=n+1}^{n+p} |u_k| < \varepsilon. \tag{13.52}$$

Имея в виду, что модуль суммы нескольких слагаемых не превосходит суммы их модулей, можем записать

$$\left| \sum_{k=n+1}^{n+p} u_k \right| \leqslant \sum_{k=n+1}^{n+p} |u_k|. \tag{13.53}$$

Сопоставляя неравенства (13.52) и (13.53), получим неравенство (13.51). Теорема доказана.

Определение 2. *Ряд* (13.49) *называется условно сходящимся, если этот ряд сходится, в то время как соответствующий ряд из модулей* (13.50) *расходится.*

Примером *абсолютно* сходящегося ряда может служить ряд

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1}}{k^\alpha} = 1 - \frac{1}{2^\alpha} + \frac{1}{3^\alpha} - \frac{1}{4^\alpha} + \ldots, \text{ где } \alpha > 1.$$

Этот ряд сходится абсолютно, ибо при $\alpha > 1$ сходится ряд (13.33). Приведем пример *условно* сходящегося ряда. Докажем

условную сходимость ряда

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1}}{k} = 1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \ldots + \frac{(-1)^{n-1}}{n} + \ldots \tag{13.54}$$

Так как соответствующий ряд из модулей (гармонический ряд), как мы уже знаем, *расходится*, то для доказательства условной сходимости ряда (13.54) достаточно доказать, что этот ряд сходится. Докажем, что ряд (13.54) сходится к числу $\ln 2$. В п. 2 § 15 гл. 8 мы получили разложение по формуле Маклорена функции $\ln(1+x)$

$$\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \ldots + (-1)^{n-1}\frac{x^n}{n} + R_{n+1}(x). \tag{13.55}$$

Там же для всех x из сегмента $0 \leqslant x \leqslant 1$ получена следующая оценка остаточного члена:

$$|R_{n+1}(x)| < \frac{1}{n+1}.$$

Полагая в формулах (13.55) и (13.56) $x = 1$, будем иметь

$$\ln 2 = 1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \frac{(-1)^{n-1}}{n} + R_{n+1}(1),$$

где

$$|R_{n+1}(1)| < \frac{1}{n+1}$$

или

$$\left|\left[1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \ldots + \frac{(-1)^{n-1}}{n}\right] - \ln 2\right| < \frac{1}{n+1}.$$

Обозначая через S_n n-ю частичную сумму ряда (13.54), мы можем переписать последнее неравенство в виде

$$|S_n - \ln 2| < \frac{1}{n+1}.$$

Таким образом, разность $S_n - \ln 2$ представляет собой бесконечно малую последовательность. Это и доказывает сходимость ряда (13.54) к числу $\ln 2$.

2. О перестановке членов условно сходящегося ряда. Одним из важнейших свойств суммы конечного числа вещественных слагаемых является *переместительное свойство*. Это свойство утверждает, что от перестановки слагаемых сумма не меняется. Естественно, возникает вопрос, остается ли справедливым это свойство для суммы сходящегося ряда, т. е. *может ли измениться сумма сходящегося ряда от перестановки членов этого ряда*? В этом пункте мы выясним этот вопрос в отношении *условно сходящегося ряда*. Мы начнем наше рассмотрение с изучения некоторой конкретной перестановки членов ряда

(13.54). Для удобства запишем ряд (13.54) в виде

$$\underbrace{1-\frac{1}{2}}+\underbrace{\frac{1}{3}-\frac{1}{4}}+\ldots+\underbrace{\frac{1}{2k-1}-\frac{1}{2k}}+\ldots \tag{13.56}$$

В конце предыдущего пункта мы доказали, что ряд (13.54) сходится условно и имеет сумму $S = \ln 2$. Переставим теперь члены ряда (13.54) так, чтобы после одного положительного члена стояли два отрицательных члена. В результате такой перестановки членов получим ряд

$$\underbrace{1-\frac{1}{2}-\frac{1}{4}}+\underbrace{\frac{1}{3}-\frac{1}{6}-\frac{1}{8}}+\ldots+\left(\frac{1}{2k-1}-\frac{1}{4k-2}-\frac{1}{4k}\right)+\ldots \tag{13.57}$$

Докажем, что полученный в результате указанной перестановки членов ряда (13.54) ряд (13.57) сходится и имеет сумму, вдвое меньшую, чем ряд (13.54). Будем обозначать m-е частичные суммы рядов (13.54) и (13.57) символами S_m и S'_m соответственно. Можем записать:

$$S'_{3m}=\sum_{k=1}^{m}\left(\frac{1}{2k-1}-\frac{1}{4k-2}-\frac{1}{4k}\right)=$$
$$=\sum_{k=1}^{m}\left(\frac{1}{4k-2}-\frac{1}{4k}\right)=\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{m}\left(\frac{1}{2k-1}-\frac{1}{2k}\right)=\frac{1}{2}S_{2m}.$$

Итак,

$$S'_{3m}=\frac{1}{2}S_{2m}. \tag{13.58}$$

Далее, очевидно, что

$$S'_{3m-1}=\frac{1}{2}S_{2m}+\frac{1}{4m}, \tag{13.59}$$

$$S'_{3m-2}=S'_{3m-1}+\frac{1}{4m-2}. \tag{13.60}$$

Поскольку $\lim\limits_{m\to\infty} S_{2m} = S$, в пределе при $m \to \infty$ из формул (13.58), (13.59) и (13.60) получим

$$\lim_{m\to\infty} S'_{3m}=\frac{1}{2}S,\quad \lim_{m\to\infty} S'_{3m-1}=\frac{1}{2}S,\quad \lim_{m\to\infty} S'_{3m-2}=\frac{1}{2}S.$$

Тем самым окончательно доказано, что ряд (13.57) сходится и имеет сумму, равную $\frac{1}{2}S$. Поскольку $S = \ln 2 \neq 0$, ясно, что $\frac{1}{2}S \neq S$. Стало быть, *в результате указанной выше перестановки членов сумма условно сходящегося ряда* (13.54) *изменилась.* Рассмотренный нами конкретный пример показывает, что

условно сходящийся ряд *не обладает переместительным свойством.* Полную ясность в вопрос о влиянии перестановок членов на сумму условно сходящегося ряда вносит следующее замечательное утверждение, принадлежащее Риману.

Теорема 13.10 (теорема Римана). *Если ряд сходится условно, то, каково бы ни было наперед взятое число L, можно так переставить члены этого ряда, чтобы преобразованный ряд сходился к числу L.*

Доказательство. Пусть

$$\sum_{k=1}^{\infty} u_k \tag{13.61}$$

— произвольный условно сходящийся ряд. Обозначим через $p_1, p_2, p_3, \ldots$ *положительные члены* ряда (13.61), выписанные в таком порядке, в каком они стоят в этом ряде, а через $q_1, q_2, q_3, \ldots$ *модули отрицательных членов* ряда (13.61), выписанные в таком же порядке, в каком они стоят в этом ряде. Ряд (13.61) содержит *бесконечное число как положительных, так и отрицательных членов*, ибо если бы членов одного знака было конечное число, то, отбросив не влияющее на сходимость конечное число первых членов, мы бы получили ряд, состоящий из членов одного знака, для которого сходимость означала бы *абсолютную* сходимость. Итак, с рядом (13.61) связаны два бесконечных ряда с *положительными* членами $\sum\limits_{k=1}^{\infty} p_k$ и $\sum\limits_{k=1}^{\infty} q_k$. Будем обозначать первый из этих рядов символом P, а второй — символом Q. Докажем, что оба ряда P и Q являются расходящимися. Обозначим символом S_n n-ю частичную сумму ряда (13.61), символом P_n — сумму всех положительных членов, входящих в S_n, символом Q_n — сумму модулей всех отрицательных членов, входящих в S_n. Тогда, очевидно, $S_n = P_n - Q_n$, и так как по условию ряд (13.61) сходится к некоторому числу S, то

$$\lim_{n\to\infty} (P_n - Q_n) = S. \tag{13.62}$$

С другой стороны, так как ряд (13.61) *не сходится абсолютно*, то

$$\lim_{n\to\infty} (P_n + Q_n) = \infty. \tag{13.63}$$

Сопоставляя (13.62) и (13.63), получим $\lim\limits_{n\to\infty} P_n = \infty$, $\lim\limits_{n\to\infty} Q_n = \infty$, т. е. доказано, что оба ряда P и Q расходятся. Из расходимости рядов P и Q вытекает, что даже после удаления любого конечного числа первых членов этих рядов, мы можем взять из оставшихся членов как ряда P, так и ряда Q столь большое

число членов, что их сумма превзойдет любое наперед взятое число. Опираясь на этот факт, докажем, что можно так переставить члены исходного ряда (13.61), что в результате получится ряд, сходящийся к наперед взятому числу L. В самом деле, мы получим требуемый ряд следующим образом. Сначала выберем из исходного ряда (13.61) *ровно столько* положительных членов $p_1, p_2, p_3, \ldots, p_{k_1}$, чтобы их сумма $p_1 + p_2 + \ldots + p_{k_1}$ превзошла L. Затем добавим к выбранным членам *ровно столько* отрицательных членов $-q_1, -q_2, \ldots, -q_{k_2}$, чтобы общая сумма $p_1 + p_2 + \ldots$ $\ldots + p_{k_1} - q_1 - q_2 - \ldots - q_{k_2}$ оказалась меньше L. Затем снова добавим *ровно столько* положительных членов $p_{k_1+1}, p_{k_1+2}, \ldots, p_{k_3}$, чтобы общая сумма $p_1 + p_2 + \ldots + p_{k_1} - q_1 - q_2 - \ldots - q_{k_2} +$ $+ p_{k_1+1} + \ldots + p_{k_3}$ оказалась больше L. Продолжая аналогичные рассуждения далее, мы получим бесконечный ряд, в состав которого войдут *все члены* исходного ряда (13.61), ибо каждый раз нам придется добавлять *хотя бы один* положительный или отрицательный член исходного ряда. Остается доказать, что полученный ряд сходится к L. Заметим, что в полученном ряде последовательно чередуются *группы положительных* и *группы отрицательных* членов. Если частичная сумма полученного ряда заканчивается *полностью завершенной группой*, то отклонение этой частичной суммы от числа L не превосходит модуля последнего его члена [1]). Если же частичная сумма заканчивается *не полностью завершенной группой*, то отклонение этой частичной суммы от числа L не превосходит модуля последнего члена предпоследней из групп. Для установления сходимости ряда к L достаточно убедиться в том, что модули последних членов групп образуют бесконечно малую последовательность, а это непосредственно вытекает из необходимого условия сходимости исходного ряда (13.61). Теорема Римана доказана.

3. О перестановке членов абсолютно сходящегося ряда. В предыдущем пункте мы доказали, что *условно сходящийся ряд не обладает переместительным свойством.* В этом пункте мы докажем, что *для всякого абсолютно сходящегося ряда справедливо переместительное свойство.*

***Теорема 13.11* (*теорема Коши*).** *Если данный ряд сходится абсолютно, то любой ряд, полученный из данного ряда посредством некоторой перестановки членов, также сходится абсолютно и имеет ту же сумму, что и данный ряд.*

Доказательство. Пусть ряд

$$\sum_{k=1}^{\infty} u_k \tag{13.64}$$

[1]) Ибо мы добавляем в данную группу члены ровно до тех пор, пока общая сумма «не перейдет» через число L.

сходится абсолютно и сумма этого ряда равна S. Пусть, далее,

$$\sum_{k=1}^{\infty} u'_k \tag{13.65}$$

— ряд, полученный из ряда (13.64) посредством некоторой перестановки членов. Требуется доказать: 1) что ряд (13.65) сходится и имеет сумму, равную S; 2) что ряд (13.65) сходится абсолютно. Докажем сначала 1). Достаточно доказать, что для любого $\varepsilon > 0$ найдется номер N такой, что при $n \geqslant N$

$$\left|\sum_{k=1}^{n} u'_k - S\right| < \varepsilon. \tag{13.66}$$

Фиксируем произвольное $\varepsilon > 0$. Так как ряд (13.64) сходится абсолютно и имеет сумму, равную S, то для выбранного $\varepsilon > 0$ можно указать номер N_0 такой, что будут справедливы неравенства

$$\sum_{k=N_0+1}^{N_0+p} |u_k| < \frac{\varepsilon}{2} \quad (p \text{ — любое натуральное число}) \tag{13.67}$$

и

$$\left|\sum_{k=1}^{N_0} u_k - S\right| < \frac{\varepsilon}{2}\ ^{1)}. \tag{13.68}$$

Выберем теперь номер N столь большим, чтобы любая частичная сумма S'_n ряда (13.65) с номером n, превосходящим N, *содержала все первые* N_0 *членов ряда* (13.65) [2].

Оценим разность, стоящую в левой части (13.66), и докажем, что при $n \geqslant N$ для этой разности справедливо неравенство (13.66).

В самом деле, указанную разность можно представить в виде

$$\sum_{k=1}^{n} u'_k - S = \left(\sum_{k=1}^{n} u'_k - \sum_{k=1}^{N_0} u_k\right) + \left(\sum_{k=1}^{N_0} u_k - S\right). \tag{13.69}$$

---

[1]) Номер N_0 в неравенствах (13.67) и (13.68) можно взять *один и тот же*. В самом деле, предварительно записав указанные два неравенства с разными номерами N_0, мы затем можем взять наибольший из двух номеров N_0.

[2]) Такой номер N выбрать можно, ибо ряд (13.65) получается из ряда (13.64) посредством некоторой перестановки членов.

Так как модуль суммы двух величин не превосходит суммы их модулей, то из (13.69) получим

$$\left|\sum_{k=1}^{n} u'_k - S\right| \leqslant \left|\sum_{k=1}^{n} u'_k - \sum_{k=1}^{N_0} u_k\right| + \left|\sum_{k=1}^{N_0} u_k - S\right|. \tag{13.70}$$

Из неравенств (13.68) и (13.70) очевидно, что для доказательства неравенства (13.66) достаточно доказать, что при $n \geqslant N$

$$\left|\sum_{k=1}^{n} u'_k - \sum_{k=1}^{N_0} u_k\right| < \frac{\varepsilon}{2}. \tag{13.71}$$

Для доказательства неравенства (13.71) заметим, что при $n \geqslant N$ первая из сумм, стоящих в левой части (13.71), *содержит все* N_0 *первых членов ряда* (13.64). Вследствие этого разность

$$\sum_{k=1}^{n} u'_k - \sum_{k=1}^{N_0} u_k \tag{13.72}$$

представляет собой сумму $(n - N_0)$ членов ряда (13.64) с номерами, *каждый из которых превосходит* N_0.

Если выбрать натуральное p столь большим, чтобы номер $N_0 + p$ *превосходил номера всех* $(n - N_0)$ *членов только что указанной суммы*, то для разности (13.72), во всяком случае справедливо неравенство

$$\left|\sum_{k=1}^{n} u'_k - \sum_{k=1}^{N_0} u_k\right| \leqslant \sum_{k=N_0+1}^{N_0+p} |u_k|. \tag{13.73}$$

Из неравенств (13.73) и (13.67) вытекает неравенство (13.71). Тем самым доказано неравенство (13.66), т. е. доказано, что ряд (13.65) сходится и имеет сумму, равную S. Остается доказать утверждение 2) о том, что ряд (13.65) сходится *абсолютно*. Доказательство этого утверждения следует из утверждения 1), если его применить к рядам

$$\sum_{k=1}^{\infty} |u_k| \quad \text{и} \quad \sum_{k=1}^{\infty} |u'_k|. \tag{13.74}$$

При этом мы докажем сходимость второго из рядов (13.74), т. е. докажем абсолютную сходимость ряда (13.65). Теорема 13.11 полностью доказана.

§ 4. Арифметические операции над сходящимися рядами

В этом параграфе мы рассмотрим вопрос о возможности почленного сложения и перемножения сходящихся рядов.

Теорема 13.12. *Если два ряда* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} u_k$ *и* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} v_k$ *сходятся и имеют суммы, соответственно равные* U *и* V, *то и ряд* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} (u_k \pm v_k)$ *сходится и имеет сумму, равную* $U \pm V$.

Доказательство. Обозначим n-е частичные суммы рядов $\sum u_k$, $\sum v_k$ и $\sum (u_k \pm v_k)$ соответственно через U_n, V_n и S_n. Тогда, очевидно, $S_n = U_n \pm V_n$. Так как $\lim\limits_{n\to\infty} U_n = U$, $\lim\limits_{n\to\infty} V_n = V$, то, согласно теоремам 3.9 и 3.10, существует предел $\lim\limits_{n\to\infty} S_n = U \pm V$. Теорема доказана.

Таким образом любые сходящиеся ряды можно почленно складывать и вычитать.

Переходя к вопросу о возможности почленного перемножения рядов, докажем следующее утверждение.

Теорема 13.13. *Если два ряда* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} u_k$ *и* $\sum\limits_{l=1}^{\infty} v_l$ *сходятся абсолютно и имеют суммы, соответственно равные* U *и* V, *то ряд, составленный из всех произведений вида*

$$u_k v_l \quad (k = 1, 2, \ldots ; \ l = 1, 2, \ldots),$$

занумерованных в каком угодно порядке, также сходится абсолютно и его сумма равна UV.

Доказательство. Обозначим через $w_1, w_2, w_3, \ldots$ произведения вида $u_k v_l$ $(k = 1, 2, \ldots ; \ l = 1, 2, \ldots)$, занумерованные в каком угодно порядке. Докажем, что ряд $\sum\limits_{i=1}^{\infty} |w_i|$ сходится. Пусть S_n — n-я частичная сумма этого ряда. Сумма S_n состоит из членов вида $|u_k v_l|$. Среди индексов k и l таких членов, входящих в сумму S_n, найдется *наибольший* индекс, который мы обозначим через m.

Тогда во всяком случае

$$S_n \leqslant (|u_1| + |u_2| + \ldots + |u_m|)(|v_1| + |v_2| + \ldots + |v_m|). \qquad (13.75)$$

В правой части неравенства (13.75) стоит произведение m-х частичных сумм рядов $\sum |u_k|$ и $\sum |v_l|$. В силу сходимости указанных рядов с положительными членами все их частичные суммы (а стало быть, и их произведение) *ограничены*. Поэтому *ограни-*

чена и последовательность частичных сумм $\{S_n\}$, а это и доказывает сходимость ряда $\sum |w_i|$, т. е. *абсолютную* сходимость ряда $\sum w_i$.

Остается доказать, что последний ряд имеет сумму S, равную UV. Так как этот ряд сходится абсолютно, то в силу теоремы 13.11 его сумма S *не зависит от порядка, в котором мы его суммируем.* Какую бы мы ни взяли последовательность (а стало быть, и *подпоследовательность*[1]) частичных сумм этого ряда, она сходится к числу S. Но в таком случае сумма S ряда $\sum\limits_{i=1}^{\infty} w_i$ заведомо равна UV, ибо именно к этому числу сходится *подпоследовательность* W_m частичных сумм этого ряда вида

$$W_m = (u_1 + u_2 + \ldots + u_m)(v_1 + v_2 + \ldots + v_m).$$

Теорема 13.13 доказана.

Замечание. Произведение рядов

$$\sum_{k=1}^{\infty} u_k \quad \text{и} \quad \sum_{k=1}^{\infty} v_k$$

для многих целей удобно записывать в виде

$$\left(\sum_{k=1}^{+\infty} u_k\right)\left(\sum_{k=1}^{+\infty} v_k\right) = \\ = u_1v_1 + (u_1v_2 + u_2v_1) + \ldots + (u_1v_{k-1} + \ldots + u_{k-1}v_1) + \ldots$$

Отметим без доказательства, что ряд, полученный почленным перемножением двух рядов указанным специальным образом, сходится и в случае, когда *только один* из двух перемножаемых рядов сходится *абсолютно* (а другой ряд может при этом сходиться только условно). В случае, когда оба ряда сходятся условно, почленное перемножение их даже по этому правилу приводит, вообще говоря, к расходящемуся ряду.

§ 5. Признаки сходимости произвольных рядов

В § 2 мы установили ряд признаков сходимости для рядов с *положительными членами.* В этом параграфе мы изучим вопрос о признаках сходимости для рядов с членами любого знака. Итак, пусть

$$\sum_{k=1}^{\infty} u_k \tag{13.76}$$

[1]) В силу п. 1 § 4 гл. 3.

— ряд, члены которого имеют какие угодно знаки. Прежде всего, заметим, что для установления *абсолютной* сходимости этого ряда, т. е. для установления сходимости ряда с положительными членами

$$\sum_{k=1}^{\infty} |u_k|,$$

можно применять любой из признаков § 2 (признак Даламбера, Коши, Раабе или интегральный признак). Однако ни один из указанных признаков не дает возможности выяснить *более тонкий вопрос об условной сходимости ряда* (13.76) [1]).

Ниже мы и займемся отысканием более тонких признаков, позволяющих устанавливать сходимость ряда (13.76) и в тех случаях, когда этот ряд не является абсолютно сходящимся.

1. Признак Лейбница. Признак Лейбница относится к весьма распространенному частному виду ряда (13.76), к так называемому *знакочередующемуся* ряду. Ряд называется *знакочередующимся*, если члены этого ряда поочередно имеют то положительный, то отрицательный знаки. Знакочередующийся ряд удобно записывать так, чтобы были выявлены знаки всех его членов, т. е. в виде

$$p_1 - p_2 + p_3 - \ldots + (-1)^{k-1} p_k + \ldots, \tag{13.77}$$

где все $p_k \geqslant 0$.

***Теорема 13.14* (*признак Лейбница*).** *Если члены знакочередующегося ряда, будучи взяты по модулю, образуют невозрастающую бесконечно малую последовательность, то этот ряд сходится.*

Замечание 1. Ряд, удовлетворяющий условиям теоремы 13.14, часто называют *рядом Лейбница*.

---

[1]) Заметим, впрочем, что признаки Даламбера и Коши можно применять *для установления расходимости ряда с членами любого знака* (13.76). В самом деле, всякий раз, когда признак Даламбера или Коши констатирует расходимость ряда из модулей $\sum_{k=1}^{\infty} |u_k|$, k-й член ряда (13.76) u_k не стремится к нулю при $k \to \infty$, т. е. ряд (13.76) расходится. В качестве примера установим, что ряд $\sum_{k=1}^{\infty} k! \left(\frac{x}{k}\right)^k$ расходится для любого фиксированного значения x, удовлетворяющего неравенству $|x| > e$. Подчеркнем, что непосредственная проверка того, что k-й член рассматриваемого ряда не стремится к нулю при $k \to \infty$, является затруднительной. Применим к рассматриваемому ряду признак Даламбера. Обозначая k-й член этого ряда через a_k, будем иметь $\frac{|a_{k+1}|}{|a_k|} = \frac{|x|}{\left(1+\frac{1}{k}\right)^k}$, откуда $\lim\limits_{k\to\infty} \frac{|a_{k+1}|}{|a_k|} = \frac{|x|}{e} > 1$. Расходимость ряда доказана.

Доказательство теоремы 13.14. Пусть дан ряд (13.77) и известно, что последовательность $\{p_k\}$ является невозрастающей и бесконечно малой. Частичную сумму этого ряда *четного* порядка S_{2n} можно записать в виде

$$S_{2n} = (p_1 - p_2) + (p_3 - p_4) + \ldots + (p_{2n-1} - p_{2n}). \qquad (13.78)$$

Так как каждая круглая скобка в (13.78) *неотрицательна*[1]), то ясно, что при возрастании n последовательность $\{S_{2n}\}$ *не убывает*.

С другой стороны, S_{2n} можно переписать в виде

$$S_{2n} = p_1 - (p_2 - p_3) - (p_4 - p_5) - \ldots - (p_{2n-2} - p_{2n-1}) - p_{2n},$$

откуда очевидно, что для любого номера n будет $S_{2n} \leqslant p_1$. Таким образом, последовательность *четных* частичных сумм S_{2n} не убывает и ограничена сверху. В силу теоремы 3.15 эта последовательность сходится к некоторому числу S, т. е. $\lim\limits_{n\to\infty} S_{2n} = S$. Из очевидного равенства $S_{2n-1} = S_{2n} + p_{2n}$ и из того, что $\lim\limits_{n\to\infty} p_{2n} = 0$, вытекает, что и последовательность *нечетных* частичных сумм $\{S_{2n-1}\}$ сходится к тому же числу S, т. е. $\lim\limits_{n\to\infty} S_{2n-1} = S$. Таким образом, вся последовательность $\{S_n\}$ сходится к S.

Замечание 2. При доказательстве теоремы 13.14 мы обнаружили, что последовательность *четных* частичных сумм $\{S_{2n}\}$ сходится к пределу S *не убывая*. Аналогично из равенства

$$S_{2n-1} = p_1 - (p_2 - p_3) - (p_4 - p_5) - \ldots - (p_{2n-2} - p_{2n-1})$$

вытекает, что последовательность нечетных частичных сумм $\{S_{2n-1}\}$ сходится к пределу S *не возрастая*.

Таким образом, для любого номера n

$$S_{2n} \leqslant S \leqslant S_{2n-1}. \qquad (13.79)$$

Поскольку $S_{2n-1} - S_{2n} = p_{2n}$ из неравенств (13.79) вытекает, что $S - S_{2n} \leqslant p_{2n}$ и $S_{2n-1} - S \leqslant p_{2n} \leqslant p_{2n-1}$. Тем самым мы получаем, что для любого номера n справедливо неравенство

$$|S_n - S| \leqslant p_n. \qquad (13.80)$$

Неравенство (13.80) широко используется для приближенных вычислений с помощью рядов.

В качестве примера рассмотрим уже неоднократно фигурировавший выше ряд

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1}}{k} = 1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \ldots + \frac{(-1)^{k-1}}{k} + \ldots \qquad (13.81)$$

[1]) Вследствие того, что $\{p_k\}$ не возрастает, т. е. $p_k \geqslant p_{k+1}$.

Заметим, что ряд (13.81) является рядом Лейбница, а поэтому сходимость его вытекает из теоремы 13.14. Пусть, например, нужно вычислить сумму ряда (13.81), т. е. число $\ln 2$, с точностью до $\frac{1}{10^n}$. В силу оценки (13.80) эта сумма с требуемой точностью совпадает с $S_{10^n} = 1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \ldots - \frac{1}{10^n}$.

2. Признак Дирихле–Абеля. Для установления еще одного тонкого признака сходимости рядов выведем одно интересное тождество, представляющее собой аналог формулы интегрирования по частям. Пусть $u_1, u_2, u_3, \ldots, v_1, v_2, v_3, \ldots$ — совершенно произвольные числа, $S_n = u_1 + u_2 + \ldots + u_n$, n и p — любые номера. Тогда справедливо следующее тождество:

$$\sum_{k=n}^{n+p} u_k v_k = \sum_{k=n}^{n+p-1} S_k(v_k - v_{k+1}) + S_{n+p}v_{n+p} - S_{n-1}v_n. \qquad (13.82)$$

Тождество (13.82) обычно называют *тождеством Абеля*[1]).

Вывод тождества Абеля. Учтем, что $u_k = S_k - S_{k-1}$, и подставим это значение u_k в левую часть (13.82). Получим

$$\sum_{k=n}^{n+p} u_k v_k = \sum_{k=n}^{n+p} S_k v_k - \sum_{k=n}^{n+p} S_{k-1} v_k.$$

В последней сумме уменьшим на единицу индекс суммирования k. Получим

$$\sum_{k=n}^{n+p} u_k v_k = \sum_{k=n}^{n+p} S_k v_k - \sum_{k=n-1}^{n+p-1} S_k v_{k+1} =$$
$$= \sum_{k=n}^{n+p-1} S_k v_k + S_{n+p}v_{n+p} - \sum_{k=n}^{n+p-1} S_k v_{k+1} - S_{n-1}v_n =$$
$$= \sum_{k=n}^{n+p-1} S_k(v_k - v_{k+1}) + S_{n+p}v_{n+p} - S_{n-1}v_n.$$

[1]) Если равенство (13.82) переписать в виде

$$\sum_{k=n}^{n+p} v_k(S_k - S_{k-1}) = S_{n+p}v_{n+p} - S_{n-1}v_n - \sum_{k=n}^{n+p-1} S_k(v_{k+1} - v_k),$$

то становится очевидным, что преобразование Абеля является по существу формулой суммирования по частям, представляющей собою разностный аналог формулы интегрирования по частям.

Мы получили выражение, совпадающее с правой частью (13.82). Тем самым тождество Абеля доказано.

Теорема 13.15 (признак Дирихле–Абеля). *Пусть дан ряд*

$$\sum_{k=1}^{\infty} u_k v_k. \tag{13.83}$$

Этот ряд сходится, если выполнены следующие два условия:

1) *последовательность* $\{v_k\}$ *является невозрастающей и бесконечно малой;*

2) *ряд* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} u_k$ *имеет ограниченную последовательность частичных сумм.*

Доказательство. Обозначим S_n n-ю частичную сумму ряда $\sum\limits_{k=1}^{\infty} u_k$. По условию существует такое число $M > 0$, что $|S_n| \leqslant M$ для всех номеров n. В силу критерия Коши достаточно доказать, что для любого $\varepsilon > 0$ найдется номер N такой, что при $n \geqslant N$ и для любого натурального p

$$\left|\sum_{k=n}^{n+p} u_k v_k\right| < \varepsilon. \tag{13.84}$$

Пусть дано любое $\varepsilon > 0$. Так как последовательность $\{v_k\}$ является бесконечно малой и не возрастает, то для положительного числа $\frac{\varepsilon}{2M}$ найдется номер N такой, что

$$0 \leqslant v_n < \frac{\varepsilon}{2M} \qquad (\text{при } n \geqslant N). \tag{13.85}$$

Применим теперь для оценки величины, стоящей в левой части (13.84), тождество Абеля (13.82). Учитывая, что модуль суммы нескольких величин не превосходит суммы их модулей, модуль произведения равен произведению модулей и что $v_k \geqslant v_{k+1}$, получим

$$\left|\sum_{k=n}^{n+p} u_k v_k\right| \leqslant \sum_{k=n}^{n+p-1} |S_k|(v_k - v_{k+1}) + |S_{n+p}|v_{n+p} + |S_{n-1}|v_n. \tag{13.86}$$

В правой части (13.86) воспользуемся неравенством $|S_n| \leqslant M$, справедливым *для всех* номеров n. Получим

$$\left|\sum_{k=n}^{n+p} u_k v_k\right| \leqslant M\left\{\sum_{k=n}^{n+p-1} (v_k - v_{k+1}) + v_{n+p}\right\} + Mv_n. \tag{13.87}$$

Далее, заметим, что сумма, стоящая в фигурных скобках, точно равна v_n. В таком случае неравенство (13.87) принимает вид

$$\left|\sum_{k=n}^{n+p} u_k v_k\right| \leqslant 2Mv_n. \tag{13.88}$$

Теперь, если в правой части (13.88) воспользоваться неравенством (13.85), получим, что при $n \geqslant N$ и для любого натурального p справедливо неравенство (13.84). Теорема доказана.

З а м е ч а н и е. Теорема 13.14 (признак Лейбница) является частным случаем теоремы 13.15 при[1] $u_k = (-1)^{k-1}$.

П р и м е р ы. 1. Исследовать на сходимость следующий ряд:

$$1 + \frac{1}{2} - \frac{2}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} - \frac{2}{6} + \ldots + \frac{1}{3n-2} + \frac{1}{3n-1} - \frac{2}{3n} + \ldots$$

Указанный ряд можно рассматривать как ряд вида (13.83) при $v_k = \frac{1}{k}$, $u_1 = 1$, $u_2 = 1$, $u_3 = -2$, $u_4 = 1$, $u_5 = 1$, $u_6 = -2$, ... Очевидно, что: 1) ряд $\sum\limits_{k=1}^{\infty} u_k$ обладает *ограниченной* последовательностью частичных сумм: $S_1 = 1$, $S_2 = 2$, $S_3 = 0$, $S_4 = 1$, $S_5 = 2$, $S_6 = 0$, ... ; 2) последовательность $\{v_k\}$ не возрастает и является бесконечно малой. По теореме 13.15 рассматриваемый ряд сходится.

2. Выясним вопрос о сходимости ряда $\sum\limits_{k=1}^{\infty} \frac{\cos kx}{k}$, где x — некоторое фиксированное вещественное число. Пользуясь обозначениями теоремы 13.15, положим $u_k = \cos kx$, $v_k = 1/k$. Оценим последовательность частичных сумм S_n ряда $\sum\limits_{k=1}^{\infty} u_k$. Поскольку для любого номера k

$$\sin\left(k + \frac{1}{2}\right)x - \sin\left(k - \frac{1}{2}\right)x = 2\sin\frac{x}{2}\cos kx,$$

то, суммируя это соотношение по k от 1 до n, получим

$$\sin\left(n + \frac{1}{2}\right)x - \sin\frac{1}{2}x = 2\sin\frac{x}{2}\sum_{k=1}^{n}\cos kx = 2S_n\sin\frac{x}{2}.$$

---

[1]) Очевидно, что ряд $\sum\limits_{k=1}^{\infty} u_k = \sum\limits_{k=1}^{\infty} (-1)^{k-1} = 1 - 1 + 1 - 1 + \ldots$ имеет ограниченную последовательность частичных сумм.

Отсюда

$$S_n = \frac{\sin\left(n+\dfrac{1}{2}\right)x - \sin\dfrac{x}{2}}{2\sin\dfrac{x}{2}}.$$

Таким образом, для любого x, *не кратного* 2π, последовательность частичных сумм S_n ограничена:

$$|S_n| \leqslant \frac{1}{\left|\sin\dfrac{x}{2}\right|}.$$

По теореме 13.15 рассматриваемый ряд *сходится для любого значения* x, *не кратного* 2π. Если же x *кратно* 2π, то рассматриваемый ряд превращается в гармонический и, как доказано выше, *расходится*.

§ 6. Бесконечные произведения

1. Основные понятия. К понятию числового ряда близко примыкает понятие *бесконечного числового произведения*. Пусть дана бесконечная числовая последовательность $v_1, v_2, \ldots, v_k, \ldots$ Записанное формально выражение вида

$$v_1 v_2 v_3 \ldots v_k \ldots = \prod_{k=1}^{\infty} v_k \qquad (13.89)$$

принято называть *бесконечным произведением*. Отдельные элементы v_k принято называть членами данного бесконечного произведения. Произведение первых n членов данного бесконечного произведения принято называть n-м частичным произведением и обозначать символом P_n:

$$P_n = v_1 v_2 \ldots v_n = \prod_{k=1}^{n} v_k.$$

Бесконечное произведение (13.89) называют *сходящимся*, если последовательность частичных произведений P_n имеет конечный предел P, *отличный от нуля*[1]). В случае сходимости бесконечного произведения (13.89) указанный предел P называют *значением этого бесконечного произведения*, т. е. пишут

$$P = \prod_{k=1}^{\infty} v_k. \qquad (13.90)$$

[1]) Тот факт, что при $P = 0$ бесконечное произведение принято считать *расходящимся*, хотя и носит условный характер, но, как мы увидим ниже, позволяет провести четкую аналогию между сходимостью рядов и бесконечных произведений.

Подчеркнем, что равенство (13.90) имеет смысл лишь для сходящегося бесконечного произведения. Ясно, что рассмотрение бесконечных произведений по существу представляет собой новую форму изучения числовых последовательностей, ибо каждому данному бесконечному произведению однозначно соответствует последовательность его частичных произведений и каждой числовой последовательности $\{P_k\}$, все элементы которой отличны от нуля, однозначно соответствует бесконечное произведение, для которого эта последовательность является последовательностью частичных произведений (достаточно положить члены бесконечного произведения равными $v_k = \dfrac{P_k}{P_{k-1}}$ при $k > 1$ и $v_1 = P_1$).

Теорема 13.16. *Необходимым условием сходимости бесконечного произведения* (13.89) *является стремление к единице его k-го члена при $k \to \infty$.*

Доказательство. Пусть бесконечное произведение (13.89) сходится и имеет значение P, отличное от нуля. Тогда $\lim\limits_{k\to\infty} P_{k-1} = \lim\limits_{k\to\infty} P_k = P \neq 0$. Поскольку $v_k = \dfrac{P_k}{P_{k-1}}$, то $\lim\limits_{k\to\infty} v_k$ существует и равен единице.

Заметим, что на сходимость бесконечного произведения *не влияет* удаление *любого конечного числа* членов этого произведения (если, конечно, среди этих членов нет равных нулю). Поскольку бесконечное произведение, у которого хотя бы *один член* равен нулю, согласно принятому выше определению, считается *расходящимся*, то мы в дальнейшем вообще *исключим из рассмотрения бесконечные произведения, у которых хотя бы один член равен нулю.*

Примеры бесконечных произведений.

1. $$\prod_{k=1}^{\infty} \cos\frac{x}{2^k} = \cos\frac{x}{2}\cos\frac{x}{4}\ldots\cos\frac{x}{2^k}\ldots \qquad (13.91)$$

(x — любое фиксированное число).

Докажем, что бесконечное произведение (13.91) сходится и имеет значение $\dfrac{\sin x}{x}$. Подсчитаем n-е частичное произведение

$$P_n = \cos\frac{x}{2}\cos\frac{x}{2^2}\ldots\cos\frac{x}{2^n}. \qquad (13.92)$$

Умножая обе части (13.92) на $\sin\dfrac{x}{2^n}$ и последовательно используя формулу для синуса двойного угла $\sin 2y = 2\sin y\cos y$, получим

$$P_n \sin\frac{x}{2^n} = \frac{1}{2^n}\sin x.$$

Из последней формулы [1]

$$P_n = \frac{\sin x}{x}\left\{\frac{\left(\frac{x}{2^n}\right)}{\sin\left(\frac{x}{2^n}\right)}\right\}.$$

Поскольку выражение в фигурных скобках стремится к единице при $n \to \infty$ (в силу первого замечательного предела), то $\lim\limits_{n\to\infty} P_n$ существует и равен $\frac{\sin x}{x}$. Тем самым доказано, что бесконечное произведение (13.91) сходится и имеет значение $\frac{\sin x}{x}$.

$$2.\ \prod_{k=2}^{\infty}\left[1 - \frac{2}{k(k+1)}\right] = \prod_{k=2}^{\infty}\frac{(k-1)(k+2)}{k(k+1)} =$$

$$= \frac{1}{2}\cdot\frac{4}{3}\cdot\frac{2}{3}\cdot\frac{5}{4}\ldots\frac{(k-1)}{k}\cdot\frac{(k+2)}{(k+1)}\ldots \qquad (13.93)$$

Докажем, что бесконечное произведение (13.93) сходится и имеет значение $\frac{1}{3}$. Подсчитаем частичное произведение P_n:

$$P_n = \frac{1}{2}\cdot\frac{2}{3}\cdot\frac{3}{4}\ldots\frac{n-1}{n}\cdot\frac{4}{3}\cdot\frac{5}{4}\cdot\frac{6}{5}\ldots\frac{n+2}{n+1} = \frac{1}{n}\cdot\frac{n+2}{3}.$$

После этого очевидно, что $\lim\limits_{n\to\infty} P_n = \lim\limits_{n\to\infty}\frac{n+2}{3n}$ существует и равен $\frac{1}{3}$.

2. Связь между сходимостью бесконечных произведений и рядов. Если бесконечное произведение (13.89) сходится, то в силу теоремы 13.16 все члены его v_k, начиная с некоторого номера k, положительны [2]. Поскольку конечное число первых членов вообще не влияет на сходимость бесконечного произведения, то при изучении вопроса о сходимости бесконечных произведений мы, не ограничивая общности, можем рассматривать лишь такие бесконечные произведения, у которых *все члены положительны.*

Теорема 13.17. *Для того чтобы бесконечное произведение* (13.89) *с положительными членами сходилось, необходимо и достаточно, чтобы сходился ряд*

$$\sum_{k=1}^{\infty}\ln v_k. \qquad (13.94)$$

---

[1] Мы считаем, что $x \neq 0$. Если $x = 0$, то все члены (13.91) и его значение равны единице.

[2] Ибо $\lim\limits_{k\to\infty} v_k = 1$.

В случае сходимости сумма S *ряда* (13.94) *и значение* P *произведения* (13.89) *связаны формулой*

$$P = e^S. \tag{13.95}$$

Доказательство. Обозначив через P_n n-е частичное произведение бесконечного произведения (13.89), а через S_n n-ю частичную сумму ряда (13.94), можем записать

$$S_n = \ln P_n, \qquad P_n = e^{S_n}.$$

В силу непрерывности показательной функции для всех значений аргумента и непрерывности логарифмической функции для всех положительных значений аргумента, последовательность P_n сходится тогда и только тогда, когда сходится S_n, причем если $\lim\limits_{n\to\infty} S_n = S$, то $\lim\limits_{n\to\infty} P_n = e^S$. Теорема доказана.

При исследовании на сходимость бесконечного произведения оказывается очень удобным представить это бесконечное произведение в виде

$$\prod_{k=1}^{\infty}(1+u_k) = (1+u_1)(1+u_2)\ldots(1+u_k)\ldots \tag{13.96}$$

При этом, конечно, в соответствии с принятым выше предположением, мы считаем, что все $u_k > -1$.

Теорема 13.17 утверждает, что вопрос о сходимости произведения (13.96) эквивалентен вопросу о сходимости ряда

$$\sum_{k=1}^{\infty} \ln(1+u_k). \tag{13.97}$$

Теперь мы можем доказать еще одно утверждение.

Теорема 13.18. *Если все* u_k (*по крайней мере начиная с некоторого номера* k) *сохраняют один и тот же знак, то для сходимости бесконечного произведения* (13.96) *необходимо и достаточно, чтобы сходился ряд*

$$\sum_{k=1}^{\infty} u_k. \tag{13.98}$$

Доказательство. Поскольку условие $\lim\limits_{k\to\infty} u_k = 0$ является необходимым и для сходимости ряда (13.98), и для сходимости произведения (13.96), мы можем считать это условие выполненным как при доказательстве необходимости, так и при доказательстве достаточности. Но из указанного условия и из

асимптотической формулы [1])

$$\ln(1+y) = y + o(y)$$

вытекает, что

$$\lim_{k\to\infty} \frac{\ln(1+u_k)}{u_k} = 1 \tag{13.99}$$

и

$$\lim_{k\to\infty} \frac{u_k}{\ln(1+u_k)} = 1. \tag{13.100}$$

Поскольку по условию теоремы все члены рядов (13.97) и (13.98), начиная с некоторого номера k, сохраняют один и тот же знак, условия (13.99) и (13.100), в силу следствия из теоремы сравнения 13.3, позволяют утверждать, что ряд (13.98) сходится тогда и только тогда, когда сходится ряд (13.97). Теорема доказана.

Примеры. 1) Из расходимости гармонического ряда и из теоремы 13.18 вытекает расходимость следующих бесконечных произведений:

$$\prod_{k=1}^{\infty}\left(1+\frac{1}{k}\right) = (1+1)\left(1+\frac{1}{2}\right)\left(1+\frac{1}{3}\right)\ldots\left(1+\frac{1}{k}\right)\ldots,$$

$$\prod_{k=1}^{\infty}\left(1-\frac{1}{k+1}\right) = \left(1-\frac{1}{2}\right)\left(1-\frac{1}{3}\right)\ldots\left(1-\frac{1}{k+1}\right)\ldots$$

Легко понять, что первое из указанных произведений расходится к $+\infty$, а второе к нулю.

2) Из той же теоремы 13.18 и из сходимости ряда (13.33) при $\alpha > 1$ вытекает сходимость при $\alpha > 1$ следующих бесконечных произведений:

$$\prod_{k=1}^{\infty}\left(1+\frac{1}{k^\alpha}\right) = (1+1)\left(1+\frac{1}{2^\alpha}\right)\left(1+\frac{1}{3^\alpha}\right)\ldots\left(1+\frac{1}{k^\alpha}\right)\ldots,$$

$$\prod_{k=1}^{\infty}\left[1-\frac{1}{(k+1)^\alpha}\right] = \left(1-\frac{1}{2^\alpha}\right)\left(1-\frac{1}{3^\alpha}\right)\ldots\left(1-\frac{1}{(k+1)^\alpha}\right)\ldots$$

Так же как и для рядов, для бесконечных произведений вводится понятие *абсолютной* и *условной* сходимости. Бесконечное произведение (13.96) называется *абсолютно сходящимся* в том и только том случае, когда сходится абсолютно ряд (13.97). Теоремы Коши 13.11 и Римана 13.10 позволяют заключить, что

[1]) См. § 7 гл. 4.

абсолютно сходящееся произведение обладает *переместительным* свойством, в то время как условно сходящееся произведение заведомо им не обладает.

Справедливо следующее утверждение.

Теорема 13.19. *Бесконечное произведение* (13.96) *сходится абсолютно тогда и только тогда, когда сходится абсолютно ряд* (13.98). Для доказательства этой теоремы достаточно доказать, что ряд $\sum\limits_{k=1}^{\infty} |u_k|$ сходится тогда и только тогда, когда сходится ряд $\sum\limits_{k=1}^{\infty} |\ln(1+u_k)|$. Это последнее легко вытекает из существования пределов (13.99) и (13.100). Детали рассуждений предоставляем читателю.

В заключение рассмотрим еще несколько примеров.

1°. Рассмотрим бесконечное произведение

$$x\prod_{k=1}^{\infty}\left(1-\frac{x^2}{k^2\pi^2}\right) = x\left(1-\frac{x^2}{\pi^2}\right)\left(1-\frac{x^2}{2^2\pi^2}\right)\left(1-\frac{x^2}{3^2\pi^2}\right)\ldots \quad (13.101)$$

Так как ряд $\sum\limits_{k=1}^{\infty}\frac{1}{k^2}$ сходится, то, в силу теорем 13.18 и 13.19, бесконечное произведение (13.101) сходится абсолютно для любого фиксированного значения x, отличного от $l\pi$ (где $l = 0, \pm 1, \ldots$). В дополнении 2 к этой главе мы докажем, что это произведение сходится к значению $\sin x$. Тем самым будет обосновано разложение функции $\sin x$ в бесконечное произведение

$$\sin x = x\prod_{k=1}^{\infty}\left(1-\frac{x^2}{k^2\pi^2}\right). \quad (13.102)$$

2°. Из разложения (13.102) путем использования соотношения $\cos x = \dfrac{\sin 2x}{2\sin x}$ элементарно получается следующее разложение:

$$\cos x = \prod_{k=1}^{\infty}\left[1-\frac{4x^2}{(2k-1)^2\pi^2}\right]. \quad (13.103)$$

Абсолютная сходимость произведения, стоящего в правой части (13.103), для любого x, отличного от $\frac{\pi}{2}(2l-1)$ ($l = 0, \pm 1, \ldots$), вытекает из теорем 13.18 и 13.19 и из сходимости ряда $\sum\limits_{k=1}^{\infty}\frac{1}{(2k-1)^2}$.

3°. Полагая в разложении (13.102) $x = \pi/2$, получим

$$\frac{2}{\pi} = \prod_{k=1}^{\infty}\left(1 - \frac{1}{4k^2}\right) = \prod_{k=1}^{\infty}\frac{4k^2-1}{4k^2} = \prod_{k=1}^{\infty}\frac{(2k-1)(2k+1)}{(2k)^2}.$$

Отсюда получается так называемая *формула Валлиса* [1])

$$\frac{\pi}{2} = \prod_{k=1}^{\infty}\frac{(2k)^2}{(2k-1)(2k+1)} = \frac{2}{1}\cdot\frac{2}{3}\cdot\frac{4}{3}\cdot\frac{4}{5}\cdots\frac{2k}{2k-1}\cdot\frac{2k}{2k+1}\cdots \qquad (13.104)$$

Путем несложных преобразований формулу Валлиса можно привести к виду

$$\frac{\pi}{2} = \lim_{k\to\infty}\frac{1}{2k+1}\left[\frac{2^{2k}(k!)^2}{(2k!)}\right]^2. \qquad (13.104^*)$$

Первоначально формулу Валлиса использовали для приближенного вычисления числа π. В настоящее время для вычисления числа π существуют более эффективные методы. Формула Валлиса (13.104) представляет интерес для ряда теоретических исследований [2]).

ДОПОЛНЕНИЕ 1

ВСПОМОГАТЕЛЬНАЯ ТЕОРЕМА ДЛЯ п. 3 § 2

Теорема 13.20. *Пусть p_k — какие угодно положительные числа. Тогда, если существует предел*

$$\lim_{k\to\infty}\frac{p_{k+1}}{p_k} = L, \qquad (13.105)$$

то существует и предел $\lim\limits_{k\to\infty}\sqrt[k]{p_k}$, причем справедлива формула

$$\lim_{k\to\infty}\sqrt[k]{p_k} = \lim_{k\to\infty}\frac{p_{k+1}}{p_k} = L. \qquad (13.106)$$

Доказательство. Прежде всего докажем следующее вспомогательное утверждение [3]): *если последовательность положительных чисел $a_1, a_2, \ldots, a_k, \ldots$ сходится к некоторому числу L, то к этому же числу L сходится и последовательность средних геометрических этих чисел $b_k = \sqrt[k]{a_1a_2\ldots a_k}$.* Для доказательства вспомогательного утверждения заметим, что в силу непрерывности логарифмической функции для $L > 0$ $\lim\limits_{k\to\infty}\ln a_k = \ln L$. (Последнее равенство формально справедливо и при $L = 0$,

[1]) Джон Валлис — английский математик (1616–1703).

[2]) В частности, она может быть использована для установления так называемой формулы Стирлинга (см. часть 2 настоящего курса). Джемс Стирлинг — английский математик (1692–1770).

[3]) Подчеркнем, что это утверждение имеет и самостоятельный интерес.

когда $\ln L = -\infty$.) Но тогда по теореме о пределе среднего арифметического (см. дополнение к гл. 3, пример 1) существует предел

$$\lim_{k\to\infty} \ln \sqrt[k]{a_1 a_2 \ldots a_k} = \lim_{k\to\infty} \frac{\ln a_1 + \ln a_2 + \ldots + \ln a_k}{k} = \ln L.$$

(Последнее равенство справедливо и при $L = 0$, когда $\ln L = -\infty$.) Из последнего равенства, в силу непрерывности показательной функции, получим

$$\lim_{k\to\infty} \sqrt[k]{a_1 a_2 \ldots a_k} = \lim_{k\to\infty} \exp(\ln \sqrt[k]{a_1 a_2 \ldots a_k}) = e^{\ln L} = L.$$

(Эти рассуждения справедливы и при $L = 0$.)

Вспомогательное утверждение доказано. Применяя это утверждение к числам $a_1 = p_1$, $a_2 = \dfrac{p_2}{p_1}$, $a_3 = \dfrac{p_3}{p_2}$, ..., $a_k = \dfrac{p_k}{p_{k-1}}$, ..., мы установим существование предела $\lim\limits_{k\to\infty} \sqrt[k]{p_k}$ и равенство (13.106). Теорема (13.20) доказана.

ДОПОЛНЕНИЕ 2

РАЗЛОЖЕНИЕ ФУНКЦИИ $\sin x$ В БЕСКОНЕЧНОЕ ПРОИЗВЕДЕНИЕ

Ради удобства разобьем вывод формулы (13.102) на отдельные пункты.

1°. Пусть m — *любое положительное нечетное число*: $m = 2n + 1$. Прежде всего докажем, что для любого отличного от $k\pi$ ($k = 0, \pm 1, \ldots$) значения θ [1]) справедлива следующая формула:

$$\frac{\sin m\theta}{m \sin\theta} = \left(1 - \frac{\sin^2\theta}{\sin^2 \dfrac{\pi}{m}}\right)\left(1 - \frac{\sin^2\theta}{\sin^2 \dfrac{2\pi}{m}}\right)\ldots\left(1 - \frac{\sin^2\theta}{\sin^2 \dfrac{n\pi}{m}}\right), \quad n = \frac{m-1}{2}. \tag{13.107}$$

Для установления формулы (13.107) будем исходить из формулы Муавра (см. § 1 гл. 7)

$$\cos m\theta + i \sin m\theta = (\cos\theta + i\sin\theta)^m.$$

Расписывая правую часть этой формулы с помощью бинома Ньютона и сравнивая мнимые части, получим

$$\sin m\theta = m \cos^{m-1}\theta \sin\theta - \frac{m(m-1)(m-2)}{1\cdot 2\cdot 3}\cos^{m-3}\theta \sin^3\theta + \ldots$$

Учитывая, что $m = 2n + 1$, будем иметь

$$\frac{\sin m\theta}{m\sin\theta} = \cos^{2n}\theta - \frac{(m-1)(m-2)}{1\cdot 2\cdot 3}\cos^{2n-2}\theta\sin^2\theta + \ldots \tag{13.108}$$

В правой части (13.108) все показатели при косинусах и синусах *четные*, так что если заменить $\cos^2\theta$ на $1 - \sin^2\theta$, то *в правой части* (13.108) *получится многочлен степени n относительно* $\sin^2\theta$. Положив $z = \sin^2\theta$, обозначим этот многочлен символом $F(z)$, а его корни символами $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_n$. Так

[1]) Нас в дальнейшем будут интересовать значения θ лишь из интервала $0 < |\theta| < \pi$.

как $z = \sin^2\theta \to 0$ при $\theta \to 0$ и поскольку левая часть (13.108) стремится к единице при $\theta \to 0$, многочлен $F(z)$ можно представить в виде

$$\frac{\sin m\theta}{m\sin\theta} = F(z) = \left(1 - \frac{z}{\alpha_1}\right)\left(1 - \frac{z}{\alpha_2}\right)\ldots\left(1 - \frac{z}{\alpha_n}\right).$$

Остается определить корни $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_n$. Замечая, что эти корни соответствуют нулям функции $\sin m\theta$, получим

$$\alpha_1 = \sin^2\frac{\pi}{m}, \quad \alpha_2 = \sin^2\frac{2\pi}{m}, \ \ldots, \ \alpha_n = \sin^2\frac{n\pi}{m}.$$

Тем самым формула (13.107) установлена.

2°. Положив в формуле (13.107) $\theta = x/m$ и считая, что $0 < |x| < \pi m$, придадим этой формуле вид

$$\frac{\sin x}{m\sin\dfrac{x}{m}} = \prod_{k=1}^{n}\left(1 - \frac{\sin^2\dfrac{x}{m}}{\sin^2\dfrac{k\pi}{m}}\right). \tag{13.109}$$

Фиксируем *любое* (отличное от нуля) значение x и возьмем два произвольных натуральных числа p и n, удовлетворяющих неравенствам $2\dfrac{|x|}{\pi} < p < n = \dfrac{m-1}{2}$. Тогда формулу (13.109) можно записать в виде

$$\frac{\sin x}{m\sin\dfrac{x}{m}} = \prod_{k=1}^{p}\left(1 - \frac{\sin^2\dfrac{x}{m}}{\sin^2\dfrac{k\pi}{m}}\right) R_p(x), \tag{13.110}$$

где

$$R_p(x) = \prod_{k=p+1}^{n}\left(1 - \frac{\sin^2\dfrac{x}{m}}{\sin^2\dfrac{k\pi}{m}}\right). \tag{13.111}$$

Прежде всего оценим $R_p(x)$. Поскольку $2\dfrac{|x|}{\pi} < p < n = \dfrac{m-1}{2}$, то аргументы всех синусов, стоящих в формуле (13.111), принадлежат интервалу $(-\pi/2, \pi/2)$. Кроме того, ясно, что для всех k, участвующих в этой формуле, $|x| < k\pi/2$ и, стало быть,

$$0 < \frac{\sin^2\dfrac{x}{m}}{\sin^2\dfrac{k\pi}{m}} < \frac{\sin^2\dfrac{k\pi}{2m}}{\sin^2\dfrac{k\pi}{m}} = \frac{1}{4\cos^2\dfrac{k\pi}{2m}} < \frac{1}{2}$$

$\left(\text{ибо } \dfrac{k\pi}{m} < \dfrac{\pi}{2}, \text{ т. е. } \dfrac{k\pi}{2m} < \dfrac{\pi}{4}, \text{ и поэтому } \cos^2\dfrac{k\pi}{2m} > \dfrac{1}{2}\right)$. Так как для любого β из интервала $0 < \beta < 1/2$ справедливы неравенства $1 > 1 - \beta > e^{-2\beta}$ [1]),

[1]) Правое из этих неравенств элементарно вытекает из формулы Маклорена: $e^{-2\beta} = 1 - 2\beta + \dfrac{(2\beta)^2}{2} - \ldots < 1 - 2\beta + 2\beta^2 < 1 - \beta$, так как $2\beta^2 < \beta$.

то для всех номеров k, превосходящих p,

$$1 > 1 - \frac{\sin^2 \dfrac{x}{m}}{\sin^2 \dfrac{k\pi}{m}} > \exp\left(-2\frac{\sin^2 \dfrac{x}{m}}{\sin^2 \dfrac{k\pi}{m}}\right). \tag{13.112}$$

Почленно перемножая неравенства (13.112), записанные для значений $k = p+1,\ p+2,\ \ldots,\ n$, получим следующую оценку для $R_p(x)$:

$$1 > R_p(x) > \exp\left(-2\sin^2\frac{x}{m}\sum_{k=p+1}^{n}\frac{1}{\sin^2\dfrac{k\pi}{m}}\right). \tag{13.113}$$

Имея в виду, что аргумент $k\pi/m$ лежит в первой четверти и что для любого β из первой четверти $1 \geqslant \dfrac{\sin\beta}{\beta} \geqslant \dfrac{2}{\pi}$ [1]), получим

$$\frac{1}{\sin^2\dfrac{k\pi}{m}} < \frac{1}{\left(\dfrac{2}{\pi}\right)^2\left(\dfrac{k\pi}{m}\right)^2} = \frac{m^2}{4k^2} < \frac{m^2}{4}\left[\frac{1}{k-1} - \frac{1}{k}\right].$$

Таким образом,

$$\exp\left(-2\sin^2\frac{x}{m}\sum_{k=p+1}^{n}\frac{1}{\sin^2\dfrac{k\pi}{m}}\right) >$$
$$> \exp\left(-\frac{m^2}{2}\sin^2\frac{x}{m}\sum_{k=p+1}^{\infty}\left[\frac{1}{k-1}-\frac{1}{k}\right]\right) = \exp\left(-\frac{m^2}{2p}\sin^2\frac{x}{m}\right).$$

Последнее неравенство позволяет следующим образом усилить оценку (13.113):

$$1 > R_p(x) > \exp\left(-\frac{m^2}{2p}\sin^2\frac{x}{m}\right). \tag{13.114}$$

3°. Устремим теперь в формуле (13.110) число m к бесконечности, оставляя фиксированными значение x и номер p. Поскольку $\lim\limits_{m\to\infty} m\sin\dfrac{x}{m} = x$, $\lim\limits_{m\to\infty} m^2\sin^2\dfrac{k\pi}{m} = k^2\pi^2$, то существует предел левой части (13.110), равный $\sin x/x$, и предел конечного произведения $\prod\limits_{k=1}^{p}\left(1 - \dfrac{\sin^2\dfrac{x}{m}}{\sin^2\dfrac{k\pi}{m}}\right)$, равный

---

[1]) Эти неравенства вытекают из того, что отношение $\dfrac{\sin\beta}{\beta}$ при изменении β от 0 до $\pi/2$ убывает от 1 до $2/\pi$. Факт убывания функции $\sin\beta/\beta$ в свою очередь вытекает из того, что $\left(\dfrac{\sin\beta}{\beta}\right)' = \dfrac{\cos\beta}{\beta^2}(\beta - \operatorname{tg}\beta) < 0$ всюду на интервале $0 < \beta < \pi/2$.

$\prod_{k=1}^{p}\left(1-\frac{x^2}{k^2\pi^2}\right)$. Далее мы будем считать, что последний предел отличен от нуля, ибо когда он равен нулю, $\sin x = 0$ и разложение (13.102) установлено. Но тогда существует и предел $\lim\limits_{m\to\infty} R_p(x)$. Обозначим этот предел через $\widehat{R}_p(x)$. Из неравенств (13.114), справедливых для любого номера m, и из теоремы 3.13 вытекает, что

$$1 \geqslant \widehat{R}_p(x) \geqslant e^{-x^2/(2p)}. \tag{13.115}$$

Формула (13.110) в пределе при $m \to \infty$ дает

$$\frac{\sin x}{x} = \prod_{k=1}^{p}\left(1-\frac{x^2}{k^2\pi^2}\right)\widehat{R}_p(x). \tag{13.116}$$

4°. Остается, сохраняя фиксированным x, устремить в формуле (13.116) номер p к бесконечности. Поскольку левая часть (13.116) от p не зависит, а предел $\lim\limits_{p\to\infty} \widehat{R}_p(x)$, в силу неравенств (13.115) и теоремы 3.14, существует и равен единице, то существует и предел

$$\lim_{p\to\infty}\prod_{k=1}^{p}\left(1-\frac{x^2}{k^2\pi^2}\right) = \frac{\sin x}{x}.$$

Тем самым разложение для $\sin x$ (13.102) установлено.

З а м е ч а н и е. В полной аналогии с разложениями (13.102) для $\sin x$ и (13.103) для $\cos x$ можно получить *разложения в бесконечные произведения гиперболических функций*

$$\operatorname{sh} x = x\prod_{k=1}^{\infty}\left(1+\frac{x^2}{k^2\pi^2}\right) \quad \text{и} \quad \operatorname{ch} x = \prod_{k=1}^{\infty}\left[1+\frac{4x^2}{(2k-1)^2\pi^2}\right].$$

Заметим, что из разложений для $\sin x$, $\cos x$, $\operatorname{sh} x$, $\operatorname{ch} x$ немедленно получаются разложения в бесконечные произведения функций $\operatorname{tg} x$, $\operatorname{ctg} x$ и $\operatorname{th} x$, $\operatorname{cth} x$.

Д О П О Л Н Е Н И Е 3

ОБОБЩЕННЫЕ МЕТОДЫ СУММИРОВАНИЯ РАСХОДЯЩИХСЯ РЯДОВ

Во всей гл. 13 мы называли суммой ряда

$$\sum_{k=1}^{\infty} u_k = u_1 + u_2 + u_3 + \ldots + u_k + \ldots \tag{13.117}$$

предел S последовательности $\{S_n\}$ частичных сумм этого ряда (при условии, что этот предел существует).

В ряде задач математического анализа, представляющих как теоретический, так и практический интерес, приходится оперировать с рядами, у которых последовательность частичных сумм не сходится и *суммы в указанном в гл.* 13 *обычном смысле не существует.* Естественно, возникает вопрос *об обобщении понятия суммы ряда и о суммировании* расходящегося в обычном смысле ряда (13.117) *с помощью каких-либо обобщенных*

методов. В настоящем дополнении мы и остановимся на некоторых обобщенных методах суммирования расходящихся рядов.

Прежде всего дадим общую характеристику тех методов суммирования, с которыми мы будем иметь дело. Разумно требовать, чтобы обобщенное понятие суммы *включало в себя* обычное понятие суммы. Точнее, *ряд, сходящийся в обычном смысле и имеющий обычную сумму* S, *должен иметь обобщенную сумму, и притом также равную* S. Метод суммирования, обладающий указанным свойством, называется *регулярным.*

Далее, естественно подчинить понятие обобщенной суммы следующему условию: *если ряд* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} u_k$ *имеет обобщенную сумму* U, *а ряд* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} v_k$ *имеет обобщенную сумму* V, *то ряд* $\sum\limits_{k=1}^{\infty} (Au_k + Bv_k)$, *где* A *и* B — *любые постоянные, имеет обобщенную сумму* $(AU + BV)$. Метод суммирования, удовлетворяющий указанному условию, называют *линейным.* В анализе и в его приложениях, как правило, имеют дело *лишь с регулярными линейными методами суммирования.* Остановимся на двух методах обобщенного суммирования, представляющих особый интерес для приложений.

1. Метод Чезаро [1] **(или метод средних арифметических).** Говорят, что *ряд* (13.117) *суммируем методом Чезаро, если существует предел средних арифметических частичных сумм этого ряда*

$$\lim_{n\to\infty} \frac{S_1 + S_2 + \ldots + S_n}{n}. \tag{13.118}$$

При этом предел (13.118) *называется обобщенной в смысле Чезаро суммой ряда* (13.117).

Линейность метода суммирования Чезаро очевидна. *Регулярность* метода Чезаро вытекает из примера 1, рассмотренного в Дополнении 1 к гл. 3. В самом деле, из указанного примера вытекает, что если последовательность $\{S_n\}$ частичных сумм ряда (13.117) сходится к числу S, то предел (13.118) существует и также равен S.

Приведем примеры рядов, не сходящихся в обычном смысле, но суммируемых методом Чезаро.

1) Рассмотрим заведомо расходящийся ряд

$$\sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k-1} = 1 - 1 + 1 - 1 + \ldots$$

Поскольку все *четные* частичные суммы S_{2n} этого ряда равны нулю, а все *нечетные* частичные суммы S_{2n-1} равны единице, то предел (13.118) существует и равен 1/2. Таким образом, рассматриваемый ряд суммируем методом Чезаро и его сумма в смысле Чезаро равна 1/2.

2) Считая, что x — любое фиксированное вещественное число из интервала $0 < x < 2\pi$, рассмотрим заведомо расходящийся [2] ряд

$$\sum_{k=1}^{\infty} \cos kx = \cos x + \cos 2x + \cos 3x + \ldots \tag{13.119}$$

---

[1] Эрнесто Чезаро — итальянский математик (1859–1906).

[2] Расходимость ряда (13.119) без труда усматривается из приведенного ниже выражения для его частичной суммы.

Частичная сумма этого ряда S_n уже подсчитана нами в примере 2 в конце § 5

$$S_n = \frac{\sin\left(n+\frac{1}{2}\right)x - \sin\frac{x}{2}}{2\sin\frac{x}{2}}.$$

Подсчитаем среднее арифметическое частичных сумм:

$$\frac{S_1+S_2+\ldots+S_n}{n} = \frac{1}{2n\sin\frac{x}{2}}\left[\sum_{m=1}^{n}\sin\left(m+\frac{1}{2}\right)x\right] - \frac{1}{2} =$$

$$= \frac{1}{4n\sin^2\frac{x}{2}}\left[\sum_{m=1}^{n}(\cos mx - \cos(m+1)x)\right] - \frac{1}{2} = \frac{\cos x - \cos(n+1)x}{4n\sin^2\frac{x}{2}} - \frac{1}{2}.$$

Отсюда очевидно, что

$$\lim_{n\to\infty}\frac{S_1+S_2+\ldots+S_n}{n} = -\frac{1}{2}.$$

Таким образом, ряд (13.119) суммируем методом Чезаро и его сумма в смысле Чезаро равна $(-1/2)$.

2. Метод суммирования Пуассона [1])–Абеля. Этот метод суммирования состоит в следующем. *По данному ряду* (13.117) *составляется степенной ряд*

$$\sum_{k=1}^{\infty} u_k x^{k-1} = u_1 + u_2 x + u_3 x^2 + \ldots + u_k x^{k-1} + \ldots \qquad (13.120)$$

Если указанный степенной ряд сходится для всех x из интервала $0 < x < 1$ и если сумма $S(x)$ этого ряда имеет левое предельное значение $\lim\limits_{x\to 1-0} S(x)$ в точке $x = 1$, то говорят, что ряд (13.117) *суммируем методом Пуассона–Абеля. При этом указанное предельное значение называется суммой ряда* (13.117) *в смысле Пуассона–Абеля.*

Линейность метода суммирования Пуассона–Абеля не вызывает сомнений. Докажем *регулярность* этого метода. Пусть ряд (13.117) сходится в обычном смысле и имеет сумму, равную S. Требуется доказать: 1) что ряд (13.120) сходится для любого x из интервала $0 < x < 1$; 2) что сумма $S(x)$ ряда (13.120) имеет в точке $x = 1$ левое предельное значение, равное S.

Докажем сначала утверждение 1). Так как ряд (13.117) сходится, то последовательность его членов является *бесконечно малой* и, стало быть, *ограниченной*, т. е. найдется такое число M, что для всех номеров k

$$|u_k| \leqslant M. \qquad (13.121)$$

Используя неравенство (13.121), оценим модуль k-го члена ряда (13.120), считая, что x — любое число из интервала $0 < x < 1$. Получим

$$|u_k x^{k-1}| \leqslant M|x|^{k-1}.$$

---

[1]) Симон Дени Пуассон — французский математик (1781–1840).

Так как $|x| < 1$, то ряд $\sum\limits_{k=1}^{\infty} |x|^{k-1}$ сходится. Стало быть, в силу замечания 2 к теореме сравнения 13.3, сходится и ряд (13.120).

Докажем теперь утверждение 2). Пусть S_n — n-я частичная сумма ряда (13.117), а S — его обычная сумма. С помощью преобразования Абеля [1]) легко убедиться в том, что для любого x из интервала $0 < x < 1$ справедливо тождество

$$\sum_{k=1}^{\infty} u_k x^{k-1} = (1-x) \sum_{k=1}^{\infty} S_k x^{k-1}. \tag{13.122}$$

Вычтем тождество (13.122) из следующего очевидного тождества:

$$S = (1-x) \sum_{k=1}^{\infty} S x^{k-1}.$$

При этом, обозначая r_k k-й остаток ряда (13.117), будем иметь

$$S - \sum_{k=1}^{\infty} u_k x^{k-1} = (1-x) \sum_{k=1}^{\infty} r_k x^{k-1},$$

или

$$S - S(x) = (1-x) \sum_{k=1}^{\infty} r_k x^{k-1}. \tag{13.123}$$

Наша цель доказать, что для любого $\varepsilon > 0$ найдется $\delta > 0$ такое, что левая часть (13.123) меньше ε для всех x, удовлетворяющих неравенствам $1-\delta < < x < 1$. Так как остаток r_k ряда (13.117) стремится к нулю при $k \to \infty$, то для положительного числа $\varepsilon/2$ найдется номер k_0 такой, что $r_k < \varepsilon/2$ при $k \geqslant k_0$. Таким образом,

$$\left|(1-x) \sum_{k=k_0}^{\infty} r_k x^{k-1}\right| < \frac{\varepsilon}{2} \left|(1-x) \sum_{k=k_0}^{\infty} x^{k-1}\right| < \frac{\varepsilon}{2}.$$

Остается доказать, что для x, достаточно близких к единице,

$$\left|(1-x) \sum_{k=1}^{k_0-1} r_k x^{k-1}\right| < \frac{\varepsilon}{2},$$

но это очевидно, ибо сумма, стоящая в последнем неравенстве, ограничена. Регулярность метода Пуассона–Абеля доказана. В качестве примера снова рассмотрим расходящийся ряд

$$\sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k-1} = 1 - 1 + 1 - 1 + \ldots \tag{13.124}$$

Для этого ряда составим степенной ряд вида (13.120)

$$\sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k-1} x^{k-1} = 1 - x + x^2 - x^3 + \ldots$$

---

[1]) Преобразование Абеля (13.82) установлено нами в п. 2 § 5. В рассматриваемом случае следует положить в (13.82) $n = 1$, $S_{n-1} = 0$ и затем устремить p к бесконечности.

Очевидно, что последний ряд сходится для всех x из интервала $0 < x < 1$ и имеет сумму, равную $S(x) = \dfrac{1}{1+x}$. Так как

$$\lim_{x \to 1-0} S(x) = \lim_{x \to 1-0} \frac{1}{1+x} = \frac{1}{2},$$

то ряд (13.124) суммируем методом Пуассона–Абеля и его сумма в смысле Пуассона–Абеля равна $1/2$.

Обратим внимание на то, что сумма ряда (13.124) в смысле Пуассона–Абеля совпадает с его суммой в смысле Чезаро. Этот факт не является случайным: можно доказать, что если ряд суммируем методом Чезаро, то он суммируем и методом Пуассона–Абеля, причем сумма этого ряда в смысле Чезаро совпадает с его суммой в смысле Пуассона–Абеля. Более того, существуют ряды, суммируемые методом Пуассона–Абеля, но не суммируемые методом Чезаро [1]). Детальное изучение всевозможных методов обобщенного суммирования расходящихся рядов проводится в монографии Г. Харди «Расходящиеся ряды» — М.: ИЛ, 1951 г.

---

[1]) Таким образом, можно сказать, что метод Пуассона–Абеля является более «сильным» методом суммирования, чем метод Чезаро.

ГЛАВА 14

ФУНКЦИИ НЕСКОЛЬКИХ ПЕРЕМЕННЫХ

§ 1. Понятие функции нескольких переменных

1. О функциональных зависимостях между несколькими переменными величинами. При изучении многих вопросов естествознания встречаются такие зависимости между несколькими переменными величинами, когда значения одной из этих переменных величин полностью определяются значениями остальных переменных. Так, при рассмотрении каких-либо физических характеристик тела (например, его плотности ρ или температуры T) нам приходится учитывать изменение этих характеристик при переходе от одной точки тела к другой. Поскольку каждая точка тела определяется тремя декартовыми координатами x, y и z, то рассматриваемые характеристики (плотность ρ или температура T) определяются значениями *трех* переменных x, y и z.

При рассмотрении физических процессов, меняющихся во времени, значения физических характеристик определяются значениями *четырех* переменных: трех координат точки x, y, z и времени t. Например, при изучении звуковых колебаний газа плотность ρ этого газа и давление p определяются значениями четырех переменных x, y, z и t. Для изучения такого рода зависимостей в этой главе вводится понятие функции нескольких переменных и развивается аппарат для исследования таких функций.

В теории функций нескольких переменных удобно пользоваться геометрической терминологией. Непосредственно ясно, что областью задания функции двух (или трех) переменных является некоторое множество точек плоскости (или пространства). Для геометризации наших представлений о функции m переменных удобно ввести понятие m-мерного пространства, обобщающее хорошо известные понятия двумерной плоскости и трехмерного пространства. Наше последующее изложе-

ние мы начнем с выяснения необходимых нам геометрических понятий.

2. Понятия евклидовой плоскости и евклидова пространства. Известные из аналитической геометрии понятия координат точек на плоскости и в пространстве и формула для определения расстояния между двумя точками могут быть использованы для аналитического введения понятий плоскости и пространства. *Множество всевозможных упорядоченных пар (x, y) вещественных чисел x и y называется координатной плоскостью.*

При этом каждую пару (x, y) мы будем называть точкой этой плоскости и обозначать одной буквой M. Числа x и y называются координатами точки M. Запись $M(x, y)$ означает, что точка M имеет координаты x и y.

Координатная плоскость называется евклидовой плоскостью, если между любыми двумя точками $M'(x', y')$ и $M''(x'', y'')$ координатной плоскости определено расстояние $\rho(M', M'')$ по формуле

$$\rho(M', M'') = \sqrt{(x'' - x')^2 + (y'' - y')^2}.$$

Совершенно аналогично вводится понятие координатного и евклидова пространств. *Множество всевозможных упорядоченных троек (x, y, z) чисел x, y и z называется координатным пространством.* При этом каждую тройку (x, y, z) мы будем называть точкой этого пространства и обозначать одной буквой M. Числа x, y и z называются координатами точки M. Запись $M(x, y, z)$ означает, что точка M имеет координаты x, y и z.

Координатное пространство называется евклидовым пространством, если между любыми двумя точками $M'(x', y', z')$ и $M''(x'', y'', z'')$ координатного пространства определено расстояние по формуле

$$\rho(M', M'') = \sqrt{(x'' - x')^2 + (y'' - y')^2 + (z'' - z')^2}.$$

Введенные нами понятия координатной плоскости и координатного пространства представляют собой аналоги числовой прямой, а евклидова плоскость и евклидово пространство представляют собой аналоги *евклидовой прямой*, которую можно определить как числовую прямую, между любыми двумя точками x' и x'' которой определено расстояние $\rho(x', x'')$ по формуле $\rho(x', x'') = \sqrt{(x'' - x')^2} = |x'' - x'|$.

Рассмотрим некоторые множества $\{M\}$ точек евклидовой плоскости и евклидова пространства.

1°. Множество $\{M\}$ точек евклидовой плоскости, координаты x и y которых удовлетворяют неравенству $(x - a)^2 + (y - b)^2 \leqslant R^2$,

как известно, называется *кругом* радиуса R с центром в точке $M_0(a, b)$. Если координаты x и y удовлетворяют строгому неравенству $(x-a)^2+(y-b)^2 < R^2$, то множество $\{M\}$ называется *открытым кругом.* В евклидовом пространстве множество $\{M\}$ точек, координаты x, y и z которых удовлетворяют неравенству $(x-a)^2+(y-b)^2+(z-c)^2 \leqslant R^2$, как известно, называется *шаром* радиуса R с центром в точке $M_0(a, b, c)$. Если координаты x, y и z удовлетворяют соответствующему строгому неравенству, то множество $\{M\}$ называется *открытым шаром*[1]).

2°. Множество $\{M\}$ точек евклидовой плоскости (евклидова пространства), координаты x и y (x, y и z) которых удовлетворяют неравенствам $|x-a| \leqslant d_1$ и $|y-b| \leqslant d_2$ ($|x-a| \leqslant d_1$, $|y-b| \leqslant d_2$ и $|z-c| \leqslant d_3$), называется *координатным прямоугольником* (*координатным параллелепипедом*) с центром в точке $M_0(a, b)$ (в точке $M_0(a, b, c)$).

3. Понятие функции двух и трех переменных. Используя геометрическую терминологию, можно следующим образом сформулировать уже известное нам понятие функции одной переменной.

Если каждой точке M из некоторого множества $\{M\}$ точек евклидовой прямой ставится в соответствие по известному закону некоторое число u, то говорят, что на множестве $\{M\}$ задана функция $u = u(M)$ или $u = f(M)$.

Введем теперь понятие функции двух переменных.

Если каждой точке M из некоторого множества $\{M\}$ точек евклидовой плоскости ставится в соответствие по известному закону некоторое число u, то говорят, что на множестве $\{M\}$ задана функция $u = u(M)$ или $u = f(M)$.

Заметим, что понятие функции двух переменных отличается от сформулированного выше понятия функции одной переменной лишь тем, что вместо слов «евклидова прямая» используется термин «евклидова плоскость». Совершенно аналогично вводится понятие функции трех переменных. Для этого вместо множества $\{M\}$ точек евклидовой плоскости нужно взять множество $\{M\}$ точек евклидова пространства.

Так как точка M евклидовой плоскости определяется двумя координатами x и y, а точка M евклидова пространства — тремя координатами x, y и z, то для функций двух и трех переменных мы будем употреблять соответственно обозначение $u = f(x, y)$ и $u = f(x, y, z)$. Если функция $u = f(M)$ задана на множестве $\{M\}$, то это множество называется *областью задания функции* $u = f(M)$. Число u, соответствующее данной точке M из мно-

[1]) Очевидно, круг и шар представляют собой множества $\{M\}$ точек плоскости и пространства, для которых $\rho(M, M_0) \leqslant R$.

жества $\{M\}$, будем называть *частным значением функции в точке* M.

Совокупность $\{u\}$ всех частных значений функции $u = f(M)$ называется *множеством значений этой функции.*

Для функции двух переменных можно ввести понятие графика, именно: *графиком функции* $u = f(x, y)$ *называется поверхность, точки которой имеют координаты* $(x, y, f(x, y))$.

Рассмотрим примеры функций двух и трех переменных.

1°. $u = \sqrt{4 - x^2 - y^2}$. Областью задания этой функции является круг радиуса 2 с центром в начале координат, а множество значений представляет собой сегмент $0 \leqslant u \leqslant 2$.

2°. $u = \dfrac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 - 4}}$. Областью задания этой функции является множество точек, лежащих вне круга радиуса 2 с центром в начале координат, а множество значений представляет собой открытую полупрямую $u > 0$.

3°. $u = \sqrt{\cos(x^2 + y^2)}$. Областью задания этой функции является множество $\{M\}$ точек, координаты которых удовлетворяют неравенству $\cos(x^2 + y^2) \geqslant 0$. Это неравенство эквивалентно неравенствам $0 \leqslant x^2 + y^2 \leqslant \frac{\pi}{2}$, $2k\pi - \frac{\pi}{2} \leqslant x^2 + y^2 \leqslant 2k\pi + \frac{\pi}{2}$, $k = 1, 2, \ldots$ Таким образом, $\{M\}$ состоит из круга радиуса $\sqrt{\pi/2}$ с центром в точке $O(0, 0)$ и кольцеобразных областей (рис. 14.1).

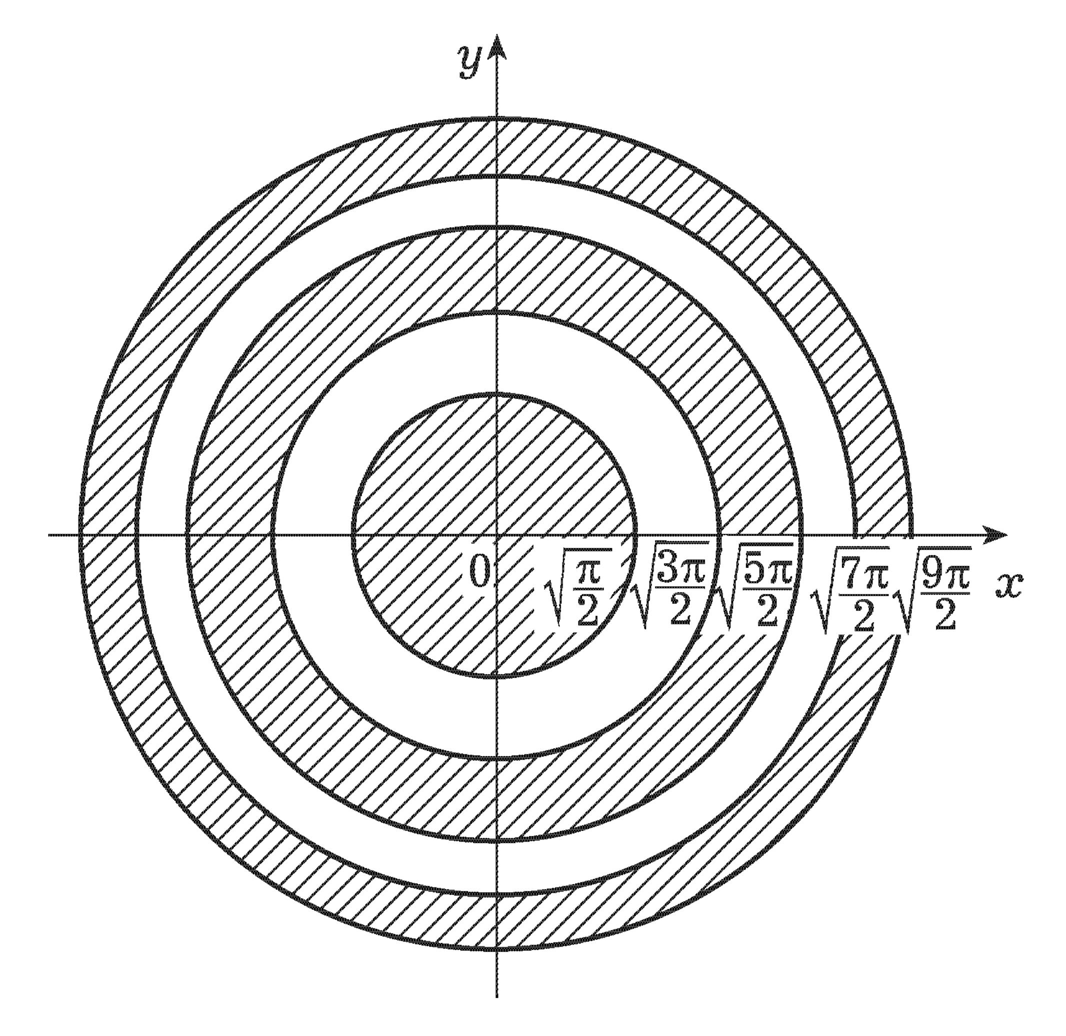


Рис. 14.1

4°. $u = \ln xyz$. Областью задания этой функции является множество $\{M\}$ точек, координаты которых удовлетворяют неравенству $xyz > 0$, а множеством значений — вся числовая прямая $-\infty < u < +\infty$.

5°. $u = x^2 + y^2 + z^2$. Областью задания этой функции является все евклидово пространство, а множеством значений — полупрямая $u \geqslant 0$.

4. Понятия m-мерного координатного пространства и m-мерного евклидова пространства. *Множество всевозможных упорядоченных совокупностей* $(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ m *чисел*

$x_1, x_2, \ldots, x_m$ *называется* *m-мерным координатным пространством* A^m.

При этом каждую упорядоченную совокупность $(x_1,\ x_2,\ \ldots$ $\ldots,\ x_m)$ мы будем называть точкой этого пространства и обозначать одной буквой M. Числа $x_1, x_2, \ldots, x_m$ называются координатами точки M. Запись $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ означает, что точка M имеет координаты $x_1, x_2, \ldots, x_m$. Введем понятие *m-мерного евклидова пространства. Координатное пространство A^m называется m-мерным евклидовым пространством E^m, если между любыми двумя точками $M'(x'_1, x'_2, \ldots, x'_m)$ и $M''(x''_1, x''_2, \ldots, x''_m)$ координатного пространства A^m определено расстояние*[1] $\rho(M', M'')$ *по формуле*

$$\rho(M', M'') = \sqrt{(x''_1 - x'_1)^2 + (x''_2 - x'_2)^2 + \ldots + (x''_m - x'_m)^2}. \quad (14.1)$$

Введенные нами понятия m-мерного координатного пространства A^m и m-мерного евклидова пространства E^m представля-

---

[1] Евклидово m-мерное пространство представляет собой так называемое *метрическое пространство*. Произвольное множество $\{M\}$, элементы которого именуются точками, называется метрическим пространством, если существует правило, с помощью которого любым двум точкам M' и M'' множества $\{M\}$ ставится в соответствие некоторое число $\rho(M', M'')$, называемое *расстоянием* между этими точками. При этом указанное правило должно быть таким, чтобы выполнялись следующие аксиомы (*аксиомы метрического пространства*): 1) для любых M' и M'' $\rho(M', M'') = \rho(M'', M')$ (симметрия расстояния); 2) для любых M' и M'' $\rho(M', M'') \geqslant 0$, причем, если $\rho(M', M'') = 0$, то точки M' и M'' совпадают; 3) для любых трех точек M', M'' и M''' выполняется неравенство $\rho(M', M''') \leqslant \rho(M', M'') + \rho(M'', M''')$ (неравенство треугольника).

Убедимся, что введенное нами евклидово m-мерное пространство действительно является метрическим пространством. В самом деле, справедливость первых двух аксиом метрического пространства очевидна (см. формулу (14.1)). Убедимся в справедливости третьей аксиомы.

Пусть x'_i, x''_i, x'''_i — координаты точек M', M'', M'''. Имеем $\rho^2(M', M''') =$ $= \sum\limits_{i=1}^{m}[(x'''_i - x''_i) + (x''_i - x'_i)]^2 = \sum\limits_{i=1}^{m}(x'''_i - x''_i)^2 + 2\sum\limits_{i=1}^{m}(x'''_i - x''_i)(x''_i - x'_i) +$ $+ \sum\limits_{i=1}^{m}(x''_i - x'_i)^2$. Полагая $x'''_i - x''_i = a_i$ и $x''_i - x'_i = b_i$ и используя неравенство Буняковского (см. неравенство (10.30) в Дополнении 1 к гл. 10), найдем, что $\sum\limits_{i=1}^{m}(x'''_i - x''_i)(x'''_i - x'_i) \leqslant \sqrt{\sum\limits_{i=1}^{m}(x'''_i - x''_i)^2}\sqrt{\sum\limits_{i=1}^{m}(x''_i - x'_i)^2}$. Отсюда следует, что $\rho^2(M', M''') \leqslant \left(\sqrt{\sum\limits_{i=1}^{m}(x'''_i - x''_i)^2} + \sqrt{\sum\limits_{i=1}^{m}(x''_i - x'_i)^2}\right)^2$, т. е. $\rho(M', M''') \leqslant$ $\leqslant \rho(M', M'') + \rho(M'', M''')$.

ют собой обобщения указанных выше понятий координатного пространства и евклидова пространства.

5. Множества точек m-мерного евклидова пространства E^m. Символом $\{M\}$ мы будем обозначать некоторое множество точек m-мерного евклидова пространства E^m. Рассмотрим несколько примеров множеств в m-мерном евклидовом пространстве E^m.

1°. Множество $\{M\}$ всевозможных точек, координаты $x_1, x_2, \ldots, x_m$ которых удовлетворяют неравенству $(x_1 - x_1^0)^2 + (x_2 - x_2^0)^2 + \ldots + (x_m - x_m^0)^2 \leqslant R^2$, называется *$m$-мерным шаром* радиуса R с центром в точке $M_0(x_1^0, x_2^0, \ldots, x_m^0)$. Таким образом, m-мерный шар определяется как множество $\{M\}$ всевозможных точек M, расстояние ρ от каждой из которых до некоторой точки M_0 (центр шара) удовлетворяет неравенству $\rho(M, M_0) \leqslant R$. Если расстояние $\rho(M, M_0)$ от каждой точки множества $\{M\}$ до точки M_0 удовлетворяет строгому неравенству $\rho(M, M_0) < R$, то множество $\{M\}$ называется *открытым m-мерным шаром.*

2°. Множество $\{M\}$ точек, расстояние от каждой из которых до некоторой точки M_0 удовлетворяет соотношению $\rho(M, M_0) = R$, называется *m-мерной сферой* радиуса R с центром в точке M_0.

3°. Множество $\{M\}$ точек, координаты $x_1, x_2, \ldots, x_m$ которых удовлетворяют неравенствам $|x_1 - x_1^0| \leqslant d_1, |x_2 - x_2^0| \leqslant d_2, \ldots \ldots, |x_m - x_m^0| \leqslant d_m$, называется *$m$-мерным координатным параллелепипедом.* При этом точка $M_0(x_1^0, x_2^0, \ldots, x_m^0)$ называется центром этого m-мерного параллелепипеда. Если координаты $x_1, x_2, \ldots, x_m$ точек множества $\{M\}$ удовлетворяют строгим неравенствам $|x_1 - x_1^0| < d_1$, $|x_2 - x_2^0| < d_2$, ..., $|x_m - x_m^0| < d_m$, то множество $\{M\}$ называется *открытым m-мерным координатным параллелепипедом.*

Введем понятия *ε-окрестности* точки M_0 евклидова m-мерного пространства и *прямоугольной окрестности* этой точки M_0. *Будем называть ε-о к р е с т н о с т ь ю т о ч к и $M_0(x_1^0, x_2^0, \ldots, x_m^0)$ m-мерного евклидова пространства E^m открытый m-мерный шар радиуса ε с центром в точке M_0. П р я м о у г о л ь н о й о к р е с т н о с т ь ю т о ч к и $M_0(x_1^0, x_2^0, \ldots, x_m^0)$ m-мерного евклидова пространства называется любой открытый m-мерный координатный параллелепипед с центром в точке M_0.*

Справедливо следующее очевидное утверждение.

Любая ε-окрестность точки M_0 евклидова m-мерного пространства E^m содержит некоторую прямоугольную окрестность этой точки. Любая прямоугольная окрестность точки M_0 содержит некоторую ε-окрестность точки M_0.

Пусть $\{M\}$ — некоторое множество точек евклидова m-мерного пространства E^m. Введем следующие понятия.

Точка M множества $\{M\}$ называется внутренней точкой этого множества, если существует некоторая ε-окрестность точки M, все точки которой принадлежат множеству $\{M\}$.

Точка M[1] *называется граничной точкой множества $\{M\}$, если любая ε-окрестность этой точки содержит как точки, принадлежащие множеству $\{M\}$, так и не принадлежащие ему.*

Множество $\{M\}$ пространства E^m называется открытым множеством или областью, если любая точка этого множества внутренняя.

Если каждая граничная точка множества $\{M\}$ является точкой этого множества, то множество $\{M\}$ называется замкнутым.

Если множество $\{M\}$ представляет собой область, то множество $\{\overline{M}\}$, полученное присоединением к $\{M\}$ всех граничных точек этого множества, называется *замкнутой областью.*

Отметим, что если все точки области $\{M\}$ находятся внутри некоторого шара, то эта область называется *ограниченной.*

В дальнейшем нам понадобится понятие *связного множества.* Предварительно мы введем понятие *непрерывной кривой* в многомерном пространстве E^m.

Непрерывной кривой L в пространстве E^m мы будем называть множество $\{M\}$ точек этого пространства, координаты $x_1, x_2, \ldots, x_m$ которых представляют собой непрерывные функции параметра t:

$$x_1 = \varphi_1(t), \quad x_2 = \varphi_2(t), \ldots, x_m = \varphi_m(t), \qquad \alpha \leqslant t \leqslant \beta. \quad (14.2)$$

Мы будем говорить, что точки $M'(x'_1, x'_2, \ldots, x'_m)$ и $M''(x''_1, x''_2, \ldots, x''_m)$ пространства E^m *можно соединить непрерывной кривой L*, если существует такая непрерывная кривая L, определяемая параметрическими уравнениями (14.2), что

$$\begin{aligned} x'_1 &= \varphi_1(\alpha), \quad x'_2 = \varphi_2(\alpha), \quad \ldots, \quad x'_m = \varphi_m(\alpha), \\ x''_1 &= \varphi_1(\beta), \quad x''_2 = \varphi_2(\beta), \quad \ldots, \quad x''_m = \varphi_m(\beta). \end{aligned}$$

Сформулируем понятие связного множества. *Множество $\{M\}$ пространства E^m называется связным, если две любые*

[1] Отметим, что при этом точка M может не принадлежать множеству $\{M\}$.

его точки можно соединить непрерывной кривой, все точки которой принадлежат этому множеству.

Замечание. Отметим, что иногда областью называют открытое и связное, а не просто открытое множество.

Рассмотрим следующий пример.

Множество $\{M\}$ точек E^m, определяемое уравнением

$$\frac{x_1^2}{a_1^2} + \frac{x_2^2}{a_2^2} + \ldots + \frac{x_m^2}{a_m^2} = 1, \tag{14.3}$$

называется m-мерным *эллипсоидом*. Точки m-мерного эллипсоида являются граничными точками множества $\{M\}$ точек M, координаты которых удовлетворяют неравенству

$$\frac{x_1^2}{a_1^2} + \frac{x_2^2}{a_2^2} + \ldots + \frac{x_m^2}{a_m^2} < 1.$$

Это множество является множеством внутренних точек m-мерного эллипсоида.

Читатель легко убедится сам, что множество внутренних точек m-мерного эллипсоида является открытым и связным множеством. Отметим, что m-мерный эллипсоид, определяемый соотношением (14.3), представляет собой замкнутое множество.

Область задания функции

$$u = \sqrt{\cos(x^2 + y^2)}$$

представляет собой *несвязное* множество (см. пример 3° п. 3 и рис. 14.1).

В заключение договоримся называть *окрестностью точки* M любое открытое связное множество, содержащее M.

6. Понятие функции m-переменных. Введем понятие функции m переменных.

Если каждой точке M из множества $\{M\}$ точек m-мерного евклидова пространства E^m ставится в соответствие по известному закону некоторое число u, то говорят, что на множестве $\{M\}$ задана функция $u = u(M)$ или $u = f(M)$. При этом, множество $\{M\}$ называется *областью задания функции $u = f(M)$*.

Число u, соответствующее данной точке M из множества $\{M\}$, будем называть *частным значением функции в точке M*. Совокупность $\{u\}$ всех частных значений функции $u = f(M)$ называется *множеством значений* этой функции. Так как точка M определяется координатами $x_1, x_2, \ldots, x_m$, то для функции $u = f(M)$ m переменных используется также обозначение $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$.

Рассмотрим примеры функций m переменных.

1°. Пусть $u = \sqrt{1 - x_1^2 - x_2^2 - \ldots - x_m^2}$. Областью задания этой функции служит, очевидно, m-мерный шар радиуса 1 с

центром в точке $O(0, 0, \ldots, 0)$. Множеством значений рассматриваемой функции является сегмент $[0, 1]$.

$2°$. Пусть $u = \dfrac{1}{\sqrt{1 - \dfrac{x_1^2}{a_1^2} - \dfrac{x_2^2}{a_2^2} - \ldots - \dfrac{x_m^2}{a_m^2}}}$. Областью задания функции является множество $\{M\}$ внутренних точек m-мерного эллипсоида. Множеством значений этой функции является полупрямая $u \geqslant 1$.

§ 2. Предельное значение функции нескольких переменных

1. Сходящиеся последовательности точек в m-мерном евклидовом пространстве E^m. Критерий Коши сходимости последовательности. Рассмотрим в m-мерном евклидовом пространстве E^m последовательность точек $\{M\}$ [1]. Сформулируем следующее определение.

Последовательность $\{M\}$ точек евклидова пространства E^m называется сходящейся, если существует такая точка A, что для любого положительного числа ε можно указать номер N [2] *такой, что при $n \geqslant N$ выполняется неравенство $\rho(M_n, A) < \varepsilon$. При этом точка A называется пределом последовательности $\{M_n\}$.* Для обозначения предела A последовательности $\{M_n\}$ используется следующая символика:

$$\lim_{n\to\infty} M_n = A, \text{ или } M_n \to A \text{ при } n \to \infty.$$

Докажем следующую лемму.

Лемма 1. *Пусть последовательность $\{M_n\}$ точек евклидова пространства E^m сходится к точке A. Тогда последовательности $\left\{x_1^{(n)}\right\}$, $\left\{x_2^{(n)}\right\}$, ..., $\left\{x_m^{(n)}\right\}$ координат точек M_n сходятся к соответствующим координатам $a_1, a_2, \ldots, a_m$ точки A, и наоборот, если последовательности $\left\{x_1^{(n)}\right\}$,*

---

[1]) Понятие последовательности точек в евклидовом пространстве E^m определяется следующим образом. Пусть каждому числу n натурального ряда чисел $1, 2, \ldots, n, \ldots$ ставится в соответствие точка M_n евклидова пространства E^m. Возникающий при этом ряд точек $M_1, M_2, \ldots, M_n, \ldots$, рассматриваемый в указанном порядке, называется *последовательностью* точек евклидова пространства E^m. Мы будем кратко обозначать эту последовательность символом $\{M_n\}$.

[2]) Так как номер N зависит, вообще говоря, от ε, то иногда пишут $N = N(\varepsilon)$.

$\left\{x_2^{(n)}\right\}, \ldots, \left\{x_m^{(n)}\right\}$ *координат точек* M_n *сходятся соответственно к числам* $a_1, a_2, \ldots, a_m$, *то последовательность* $\{M_n\}$ *сходится к точке* A *с координатами* $a_1, a_2, \ldots, a_m$.

Доказательство. Докажем первую часть леммы. Если последовательность $\{M_n\}$ сходится к точке A, то для любого $\varepsilon > 0$ можно указать номер N такой, что при $n \geqslant N$ выполняется неравенство $\rho(M_n, A) < \varepsilon$. Пусть $\left(x_1^{(n)}, x_2^{(n)}, \ldots, x_m^{(n)}\right)$ — координаты точки M_n, а $(a_1, a_2, \ldots, a_m)$ — координаты точки A. Тогда неравенство $\rho(M_n, A) < \varepsilon$ можно записать следующим образом:

$$\sqrt{\left(x_1^{(n)} - a_1\right)^2 + \left(x_2^{(n)} - a_2\right)^2 + \ldots + \left(x_m^{(n)} - a_m\right)^2} < \varepsilon. \quad (14.4)$$

Отсюда следует, что при $n \geqslant N$ выполняются неравенства

$$\left|x_1^{(n)} - a_1\right| < \varepsilon, \quad \left|x_2^{(n)} - a_2\right| < \varepsilon, \quad \ldots, \quad \left|x_m^{(n)} - a_m\right| < \varepsilon.$$

Иными словами, последовательности $\left\{x_1^{(n)}\right\}, \left\{x_2^{(n)}\right\}, \ldots, \left\{x_m^{(n)}\right\}$ координат точек M_n сходятся соответственно к числам $a_1, a_2, \ldots, a_m$. Докажем теперь обратное утверждение. Предположим, что указанные последовательности координат точек M_n сходятся соответственно к числам $a_1, a_2, \ldots, a_m$. Тогда для любого $\varepsilon > 0$ можно указать номера $N_1, N_2, \ldots, N_m$ такие, что при $n \geqslant N_1$, $n \geqslant N_2$, ..., $n \geqslant N_m$ соответственно выполняются неравенства

$$\left|x_1^{(n)} - a_1\right| < \frac{\varepsilon}{\sqrt{m}}, \quad \left|x_2^{(n)} - a_2\right| < \frac{\varepsilon}{\sqrt{m}}, \quad \ldots, \quad \left|x_m^{(n)} - a_m\right| < \frac{\varepsilon}{\sqrt{m}}.$$

Отсюда следует, что при $n \geqslant N = \max\{N_1, N_2, \ldots, N_m\}$ выполняется неравенство (14.4). Иными словами, при $n \geqslant N$ выполняется неравенство $\rho(M_n, A) < \varepsilon$, где A — точка E^m с координатами $a_1, a_2, \ldots, a_m$. Таким образом, последовательность $\{M_n\}$ сходится к точке A. Лемма доказана.

Сформулируем определение фундаментальной последовательности точек в m-мерном евклидовом пространстве. *Последовательность* $\{M_n\}$ *точек* m-*мерного евклидова пространства называется* ***фундаментальной*** *или последовательностью Коши, если для любого положительного числа* ε *можно указать такой номер* N, *что при* $n \geqslant N$ *и для любого натурального* p *выполняется неравенство* $\rho(M_{n+p}, M_n) < \varepsilon$. Справедлив следующий критерий сходимости последовательности (критерий Коши).

Для того чтобы последовательность $\{M_n\}$ *точек* m*-мерного евклидова пространства была сходящейся, необходимо и достаточно, чтобы она была фундаментальной.* Чтобы убедиться в справедливости сформулированного критерия, достаточно заметить, что из условия фундаментальности последовательности $\{M_n\}$ следует, что последовательности $\left\{x_1^{(n)}\right\}$, $\left\{x_2^{(n)}\right\}$, … …, $\left\{x_m^{(n)}\right\}$ координат точек M_n также фундаментальны, и наоборот, если указанные последовательности координат фундаментальны, то фундаментальной будет и последовательность $\{M_n\}$, и затем применить критерий Коши для числовых последовательностей к последовательностям координат точек $\{M_n\}$ и лемму 1 этого пункта.

2. Некоторые свойства ограниченных последовательностей точек в m**-мерном евклидовом пространстве.** Введем понятие ограниченной последовательности точек в m-мерном евклидовом пространстве. *Последовательность* $\{M_n\}$ *точек* m*-мерного евклидова пространства называется о г р а н и ч е н н о й, если существует такое число* $a > 0$, *что для всех* n *выполняется неравенство* $\rho(O, M_n) \leqslant a$, *где* O – *точка, все координаты которой равны нулю.* Иными словами, последовательность $\{M_n\}$ является ограниченной, если все точки $\{M_n\}$ этой последовательности находятся внутри или на границе некоторого шара с центром в начале координат.

Справедлива следующая *основная* теорема.

Теорема 14.1 (теорема Больцано–Вейерштрасса). *Из любой ограниченной последовательности* $\{M_n\}$ *точек* m*-мерного евклидова пространства можно выделить сходящуюся подпоследовательность.*

Д о к а з а т е л ь с т в о. Убедимся, во-первых, что последовательности $\left\{x_1^{(n)}\right\}$, $\left\{x_2^{(n)}\right\}$, …, $\left\{x_m^{(n)}\right\}$ координат точек M_n являются ограниченными. Действительно, так как последовательность $\{M_n\}$ ограничена, то для всех n выполняется неравенство $\rho(O, M_n) \leqslant a$. Поскольку $\rho(O, M_n) = \sqrt{x_1^{(n)^2} + x_2^{(n)^2} + \ldots + x_m^{(n)^2}}$, то отсюда следует, что для всех n выполняются неравенства $\left|x_1^{(n)}\right| \leqslant a$, $\left|x_2^{(n)}\right| \leqslant a$, …, $\left|x_m^{(n)}\right| \leqslant a$. Иными словами, последовательности $\left\{x_1^{(n)}\right\}$, $\left\{x_2^{(n)}\right\}$, …, $\left\{x_m^{(n)}\right\}$ координат точек M_n ограничены. В силу теоремы Больцано–Вейерштрасса для числовых последовательностей (см. п. 4 § 4 гл. 3) из последовательности $\left\{x_1^{(n)}\right\}$ можно выделить последова-

тельность $\left\{x_1^{(n_{k_1})}\right\}$, сходящуюся к некоторому числу a_1. Рассмотрим соответствующую подпоследовательность $\left\{x_2^{(n_{k_1})}\right\}$ последовательности вторых координат точек $\{M_n\}$. В силу той же теоремы из подпоследовательности $\left\{x_2^{(n_{k_1})}\right\}$ можно выделить подпоследовательность $\left\{x_2^{(n_{k_2})}\right\}$, сходящуюся к некоторому числу a_2. Заметим, что подпоследовательность $\left\{x_1^{(n_{k_2})}\right\}$ последовательности $\left\{x_1^{(n_{k_1})}\right\}$ сходится к числу a_1. Итак, подпоследовательности $\left\{x_1^{(n_{k_2})}\right\}$ и $\left\{x_2^{(n_{k_2})}\right\}$ сходятся к числам a_1 и a_2 соответственно. Очевидно, что если мы из подпоследовательности $\left\{x_3^{(n_{k_2})}\right\}$ последовательности третьих координат точек M_n выделим сходящуюся к некоторому числу a_3 подпоследовательность $\left\{x_3^{(n_{k_3})}\right\}$, то подпоследовательности $\left\{x_1^{(n_{k_3})}\right\}$, $\left\{x_2^{(n_{k_3})}\right\}$, $\left\{x_3^{(n_{k_3})}\right\}$ сходятся соответственно к числам a_1, a_2, a_3. Продолжая эти рассуждения, мы, наконец, получим сходящуюся к некоторому числу a_m подпоследовательность $\left\{x_m^{(n_{k_m})}\right\}$ последовательности m-х координат точек M_n, причем подпоследовательности $\left\{x_1^{(n_{k_m})}\right\}$, $\left\{x_2^{(n_{k_m})}\right\}, \ldots, \left\{x_m^{(n_{k_m})}\right\}$ сходятся к числам $a_1, a_2, \ldots, a_m$ соответственно. Но тогда, в силу леммы 1, подпоследовательность $\{M_{n_{k_m}}\}$ последовательности точек $\{M_n\}$ сходится к точке A с координатами $a_1, a_2, \ldots, a_m$. Теорема доказана.

З а м е ч а н и е. Предел A последовательности $\{M_n\}$ точек, принадлежащих замкнутому множеству $\{M\}$, также принадлежит этому множеству. Чтобы убедиться в этом, достаточно заметить, что в любой ε-окрестности точки A имеются точки M_n, т. е. точки множества $\{M\}$, и поэтому точка A является либо внутренней, либо граничной точкой $\{M\}$, а следовательно, принадлежит $\{M\}$.

3. Понятие предельного значения функции нескольких переменных. Рассмотрим функцию $u = f(M)$, определенную на множестве $\{M\}$ m-мерного евклидова пространства, и точку A этого множества, быть может, и не принадлежащую множеству $\{M\}$, но обладающую тем свойством, что в любой ε-окрестности этой точки содержится хотя бы одна точка множества $\{M\}$, отличная от A.

Определение 1. *Число b называется п р е д е л ь н ы м з н а ч е н и е м ф у н к ц и и $u = f(M)$ в*

точке A (*или пределом функции при* $M \to A$), *если для любой сходящейся к* A *последовательности* $M_1, M_2, \ldots, M_n, \ldots$ *точек множества* $\{M\}$, *элементы* M_n *которой отличны от* A[1] ($M_n \neq A$), *соответствующая последовательность* $f(M_1), f(M_2), \ldots, f(M_n), \ldots$ *значений функции сходится к* b.

Приведенное определение называется определением предельного значения функции с помощью последовательностей. Сформулируем другое определение предельного значения функции, используя «ε–δ»-терминологию.

Определение 2. *Число* b *называется предельным значением функции* $u = f(M)$ *в точке* A, *если для любого положительного числа* ε *можно указать такое положительное число* δ, *что для всех точек* M *из области задания функции, удовлетворяющих условию* $0 < \rho(M, A) < \delta$, *выполняется неравенство* $|f(M) - b| < \varepsilon$.

Замечание. Определения 1 и 2 предельного значения функции эквивалентны. Справедливость этого утверждения может быть доказана точно так же, как и эквивалентность двух определений предельного значения функции одной переменной.

Для обозначения предельного значения b функции $u = f(M)$ в точке A используется следующая символика:

$$\lim_{M\to A} f(M) = b, \quad \text{или} \lim_{\substack{x_1\to a_1,\\ x_2\to a_2,\\ \cdots\cdots \\ x_m\to a_m}} f(x_1, x_2, \ldots, x_m) = b,$$

где $a_1, a_2, \ldots, a_m$ — координаты точки A.

Сформулируем определение предельного значения функции при стремлении точки M к бесконечности.

Определение 3. *Число* b *называется предельным значением функции* $u = f(M)$ *при* $M \to \infty$ (*или пределом функции при* $M \to \infty$), *если для любого положительного числа* ε *можно указать такое положительное число* a, *что для всех* M *из области задания функции, удовлетворяющих условию* $\rho(O, M) > a$, *выполняется неравенство* $|f(M) - b| < \varepsilon$.

Арифметические операции над функциями m переменных, имеющими предельное значение в точке A, приводят к функциям, также имеющим предельное значение в точке A. Именно, справедливо следующее утверждение.

Пусть функции $f(M)$ *и* $g(M)$ *имеют в точке* A *предельные значения* b *и* c. *Тогда функции* $f(M)+g(M)$, $f(M)-g(M)$, $f(M)\cdot$

---

[1]) Это требование объясняется, в частности, тем, что функция $u = f(M)$ может быть не определена в точке A.

$\cdot g(M)$ и $\dfrac{f(M)}{g(M)}$ имеют в точке A предельные значения (частное при условии $c \neq 0$), равные соответственно $b+c$, $b-c$, $b\cdot c$, $\dfrac{b}{c}$.

Доказательство этого утверждения совершенно аналогично доказательству теоремы 4.1.

4. Бесконечно малые функции. *Функция $u = f(M)$ называется бесконечно малой в точке A (при $M \to A$), если $\lim\limits_{M\to A} f(M) = 0$.*

Легко убедиться, что функция $f(M) = (x_1 - a_1)^{n_1} + \ldots \ldots + (x_m - a_m)^{n_m}$, где $n_1, \ldots, n_m$ — положительные числа, является бесконечно малой в точке $A(a_1, a_2, \ldots, a_m)$ [1].

Если функция $u = f(M)$ имеет равное b предельное значение в точке A, то функция $\alpha(M) = f(M) - b$ является бесконечно малой в точке A. Действительно, $\lim\limits_{M\to A} \alpha(M) = \lim\limits_{M\to A} (f(M) - -b) = \lim\limits_{M\to A} f(M) - \lim\limits_{M\to A} b = 0$. Используя этот результат, мы получим специальное представление для функции, имеющей равное b предельное значение в точке A:

$$f(M) = b + \alpha(M), \quad \text{где} \quad \lim_{M\to A} \alpha(M) = 0.$$

Сравнение бесконечно малых функций нескольких переменных производится точно так же, как это указано в п. 3 § 2 гл. 4 для бесконечно малых функций одной переменной. Отметим, что, как и в случае одной переменной, под символом $o(\beta)$ мы будем понимать любую бесконечно малую в данной точке A функцию более высокого порядка малости, чем бесконечно малая в данной точке A функция $\beta(M)$.

5. Необходимое и достаточное условие существования предельного значения функции (критерий Коши). Будем говорить, что функция $f(M)$ *удовлетворяет в точке $M = A$ условию Коши*, если для любого положительного числа ε найдется положительное число δ такое, что, каковы бы ни были две точки M' и M'' из области задания функции $f(M)$, удовлетворяющие неравенствам $0 < \rho(M', A) < \delta$, $0 < \rho(M'', A) < \delta$, для соответствующих значений функций справедливо неравенство

$$|f(M') - f(M'')| < \varepsilon.$$

Справедлива следующая основная теорема

Теорема 14.2 (критерий Коши). *Для того чтобы функция $f(M)$ имела конечное предельное значение в точке $M = A$,*

---

[1] Достаточно учесть, что каждая из функций одной переменной $f(x_k) = (x_k - a_k)^{n_k}$ является бесконечно малой в точке $x_k = a_k$.

необходимо и достаточно, чтобы функция $f(M)$ удовлетворяла в этой точке условию Коши. Доказательство этой теоремы совершенно аналогично доказательству теоремы 8.2 и получается из него путем замены букв x и a на буквы M и A и замены выражений типа $|x-a|$ на символ $\rho(M,A)$.

6. Повторные предельные значения. Для функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ нескольких переменных можно определить понятие предельного значения по одной из переменных x_k при фиксированных значениях остальных переменных. В связи с этим возникает понятие *повторного предельного значения.* Уясним это понятие на примере функции $u = f(x,y)$ двух переменных x и y. Пусть функция $u = f(x,y)$ задана в некоторой прямоугольной окрестности $|x-x_0| < d_1$, $|y-y_0| < d_2$ точки $M_0(x_0,y_0)$, за исключением, быть может, самой точки M_0. Пусть для каждого фиксированного y, удовлетворяющего условию $0 < |y-y_0| < d_2$, существует предельное значение функции $u = f(x,y)$ одной переменной x в точке $x = x_0$:

$$\lim_{\substack{x\to x_0\\ y-\text{фикс}}} f(x,y) = \varphi(y),$$

и пусть, кроме того, существует предельное значение b функции $\varphi(y)$ в точке $y = y_0$:

$$\lim_{y\to y_0} \varphi(y) = b.$$

В этом случае говорят, что существует *повторное* предельное значение b для функции $u = f(x,y)$ в точке M_0, которое обозначается следующим образом:

$$\lim_{y\to y_0} \lim_{x\to x_0} f(x,y) = b.$$

Аналогично определяется повторное предельное значение

$$\lim_{x\to x_0} \lim_{y\to y_0} f(x,y).$$

Установим достаточные условия равенства двух введенных повторных предельных значений.

Теорема 14.3. *Пусть функция $u = f(x,y)$ определена в некоторой прямоугольной окрестности $|x-x_0| < d_1$, $|y-y_0| < d_2$ точки $M_0(x_0,y_0)$ и имеет в этой точке предельное значение b. Пусть, кроме того, для любого фиксированного x, $0 < |x-x_0| < d_1$, существует предельное значение $\psi(x) = \lim\limits_{y\to y_0} f(x,y)$ и для любого фиксированного y, $0 < |y-y_0| < d_2$, существует предельное значение $\varphi(y) = \lim\limits_{x\to x_0} f(x,y)$. Тогда повторные предельные значения $\lim\limits_{x\to x_0} \lim\limits_{y\to y_0} f(x,y)$ и $\lim\limits_{y\to y_0} \lim\limits_{x\to x_0} f(x,y)$ существуют и равны b.*

Доказательство. Так как функция $u = f(x,y)$ имеет в $M_0(x_0,y_0)$ предельное значение b, то для любого $\varepsilon > 0$ можно указать такое $\delta > 0$, что при $|x-x_0| < \delta$ и $|y-y_0| < \delta$ выполняется неравенство $|f(x,y) - b| < \varepsilon$. Таким образом, в прямоугольной окрестности $|x-x_0| < \delta$ и $|y-y_0| < \delta$ точки M_0 значения функции $f(x,y)$ отличаются от b не больше чем на ε. Но тогда предельные значения $\psi(x)$ и $\varphi(x)$, указанные в формулировке теоремы при x и y, удовлетворяющих неравенствам $|x-x_0| < \delta$ и $|y-y_0| < \delta$, также отличаются от b не больше чем на ε. Следовательно, и предельные значения этих функций в точках x_0 и y_0 соответственно существуют и равны b. Теорема доказана.

Можно определить понятие повторного предела для так называемых двойных последовательностей $\{a_{mn}\}$, элементы a_{mn} которых определяются двумя индексами m и n. Именно, символ $\lim\limits_{n\to\infty}\lim\limits_{m\to\infty} a_{mn}$ означает, что сначала определяется последовательность $\{b_n\}$, $b_n = \lim\limits_{m\to\infty} a_{mn}$, а затем находится предел этой последовательности $\{b_n\}$.

Рассмотрим, например, двойную последовательность $\{a_{mn}\}$, где $a_{mn} = \cos^m 2\pi n!x$, x– фиксированное число. Докажем, что

$$\lim_{n\to\infty}\lim_{m\to\infty}\cos^m 2\pi n!x = \begin{cases} 1, & \text{если } x \text{ — рациональное число,}\\ 0, & \text{если } x \text{ — иррациональное число.}\end{cases}$$

В самом деле, если $x = p/q$, где p и q — целые числа, то при $n \geqslant q$ имеем $\cos 2\pi n!x = 1$, и поэтому $\lim\limits_{\substack{m\to\infty\\ n\geqslant q}} \cos^m 2\pi n!x = 1$. Иными словами, если x — рациональное число, то $\lim\limits_{n\to\infty}\lim\limits_{m\to\infty}\cos^m 2\pi n!x = 1$. Если же x — иррациональное число, то при любом n справедливо неравенство $|\cos 2\pi n!x| < 1$, и поэтому $\lim\limits_{m\to\infty}\cos^m 2\pi n!x = 0$, т. е. $\lim\limits_{n\to\infty}\lim\limits_{m\to\infty}\cos^m 2\pi n!x = 0$.

Замечание. Используя полученный результат, мы можем аналитическим способом задать функцию Дирихле (см. п. 1 § 1 гл. 4) как повторный предел $\lim\limits_{n\to\infty}\lim\limits_{m\to\infty}\cos^m 2\pi n!x$.

§ 3. Непрерывные функции нескольких переменных

1. Определение непрерывности функции нескольких переменных. Пусть точка A принадлежит области задания функции $u = f(M)$ нескольких переменных и любая ε-окрестность точки A содержит отличные от A точки области задания этой функции.

Определение 1. *Функция $u = f(M)$ называется непрерывной в точке A, если предельное значение этой функции в точке A существует и равно частному значению $f(A)$.* Отметим, что так как $A = \lim\limits_{M\to A} M$, то условие непрерывности функции можно записать в следующей форме:

$$\lim_{M\to A} f(M) = f\Big(\lim_{m\to A} M\Big).$$

Точки, в которых функция не обладает свойством непрерывности, называются *точками разрыва* этой функции.

Сформулируем определение непрерывности функции, используя определение предельного значения функции с помощью ε и δ.

Определение 2. *Функция $u = f(M)$ называется непрерывной в точке A, если для любого положительного числа ε можно указать такое положительное число δ, что для всех то-*

чек M из области задания функции, удовлетворяющих условию $\rho(M, A) < \delta$, выполняется неравенство $|f(M) - f(A)| < \varepsilon$.

Определение 3. *Функция $u = f(M)$ называется непрерывной на множестве $\{M\}$, если она непрерывна в каждой точке этого множества.*

Назовем *приращением* или *полным приращением функции $u = f(M)$ в точке A функцию Δu, определяемую формулой*

$$\Delta u = f(M) - f(A), \tag{14.5}$$

где M — любая точка из области задания функции. Пусть точки A и M имеют соответственно координаты $a_1, a_2, \ldots, a_m$ и $x_1, x_2, \ldots, x_m$. Обозначим $x_1 - a_1 = \Delta x_1$, $x_2 - a_2 = \Delta x_2$, … …, $x_m - a_m = \Delta x_m$. Используя эти обозначения, получим для приращения функции Δu, соответствующего приращениям аргументов $\Delta x_1, \ldots, \Delta x_m$, следующее выражение:

$$\Delta u = f(a_1 + \Delta x_1, a_2 + \Delta x_2, \ldots, a_m + \Delta x_m) - f(a_1, a_2, \ldots, a_m). \tag{14.6}$$

Очевидно, *для непрерывности функции $u = f(M)$ в точке A необходимо и достаточно, чтобы ее приращение Δu представляло собой бесконечно малую в точке A функцию*, т. е. необходимо и достаточно, чтобы

$$\lim_{M \to A} \Delta u = \lim_{M \to A} (f(M) - f(A)) = 0 \text{ или } \lim_{\substack{\Delta x_1 \to 0,\\ \Delta x_2 \to 0,\\ \cdots\cdots \\ \Delta x_m \to 0}} \Delta u = 0. \tag{14.7}$$

Условие (14.7) мы будем называть *разностной формой условия непрерывности функции $u = f(M)$ в точке A.*

Для функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ нескольких переменных можно определить понятие непрерывности по одной из переменных при фиксированных значениях остальных переменных. Для определения этого понятия рассмотрим так называемые *частные приращения* функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ в точке $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, принадлежащей области определения функции. Зафиксируем все аргументы, кроме первого, а первому аргументу придадим произвольное приращение Δx_1 такое, чтобы точка с координатами $x_1 + \Delta x_1, x_2, \ldots, x_m$ находилась в области задания функции. Соответствующее приращение

функции называется *частным приращением* [1]) функции в точке $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, соответствующим приращению Δx_1 аргумента x_1 и обозначается $\Delta_{x_1} u$. Таким образом,

$$\Delta_{x_1} u = f(x_1 + \Delta x_1, x_2, \ldots, x_m) - f(x_1, x_2, \ldots, x_m). \qquad (14.8)$$

Аналогично определяются частные приращения функции, соответствующие приращениям других аргументов:

$$\begin{aligned} &\Delta_{x_2} u = f(x_1, x_2 + \Delta x_2, x_3, \ldots, x_m) - f(x_1, x_2, \ldots, x_m), \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \qquad (14.9) \\ &\Delta_{x_m} u = f(x_1, x_2, \ldots, x_{m-1}, x_m + \Delta x_m) - f(x_1, x_2, \ldots, x_m). \end{aligned}$$

Введем теперь понятие непрерывности функции $u = f(x_1, x_2, \ldots$ $\ldots, x_m)$ по одной из переменных.

Функция $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ *называется непрерывной в точке* $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ *по переменной* x_k, *если частное приращение* $\Delta_{x_k} u$ *этой функции в точке* M *представляет собой бесконечно малую функцию от* Δx_k, *т. е. если*

$$\lim_{\Delta x_k \to 0} \Delta_{x_k} u = 0. \qquad (14.10)$$

При фиксированных значениях всех переменных, кроме переменной x_k, функция $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ представляет собой функцию одной этой переменной. Отметим, что непрерывность функции по переменной x_k означает непрерывность указанной функции одной переменной. Очевидно, из условия непрерывности функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ в данной точке M вытекает непрерывность этой функции в точке M по каждой из переменных $x_1, x_2, \ldots, x_m$. Однако из непрерывности функции в точке M по каждой из переменных $x_1, x_2, \ldots, x_m$ не вытекает, вообще говоря, непрерывность функции в этой точке. Чтобы убедиться в этом, рассмотрим следующие примеры:

1°. Мы будем говорить, что функция $u = f(M) = f(x, y)$ непрерывна в точке M на некоторой прямой, проходящей через эту точку, если для любой последовательности точек $\{M_n\}$ этой прямой, сходящейся к точке M, соответствующая последовательность $\{f(M_n)\}$ значений функции имеет пределом частное значение $f(M)$ функции в точке M. Так как на прямой функция $u = f(x, y)$ представляет собой функцию одной переменной, то понятие непрерывности функции на прямой совпадает, очевидно, с понятием непрерывности указанной функции одной

[1]) Термин «частное приращение» употребляется для того, чтобы отличить это приращение от полного приращения (14.6), соответствующего произвольным приращениям $\Delta x_1, \Delta x_2, \ldots, \Delta x_m$ всех аргументов $x_1, x_2, \ldots, x_m$.

переменной. В частности, непрерывность функции в точке M по отдельным переменным x и y представляет собой непрерывность ее на прямых, проходящих через точку M и параллельных координатным осям. Докажем, что функция

$$u = \begin{cases} \dfrac{xy}{x^2+y^2} & \text{при} \quad x^2+y^2 \neq 0, \\ 0 & \text{при} \quad x^2+y^2 = 0 \end{cases}$$

непрерывна в точке $O(0,0)$ по каждой из переменных x и y, т. е. непрерывна на каждой из координатных осей, но не является непрерывной на всех остальных прямых, проходящих через эту точку, и поэтому не является непрерывной в точке O. Каждая прямая, отличная от координатных осей и проходящая через точку $O(0,0)$, может быть представлена уравнением $y = kx$, где $k \neq 0$. Очевидно, на такой прямой все значения функции постоянны и равны $\dfrac{k}{1+k^2}$. Поэтому, если последовательность $\{M_n\}$ отличных от O точек такой прямой сходится к точке O, то соответствующая последовательность значений функции имеет предел $\dfrac{k}{1+k^2}$. Так как при $k \neq 0$ этот предел отличен от нуля и не совпадает с частным значением функции в точке O, то функция разрывна в этой точке на рассматриваемой прямой. Непрерывность функции на координатных осях вытекает из того, что ее значения на этих осях равны нулю.

Может сложиться впечатление, что если функция двух переменных непрерывна на любой прямой, проходящей через данную точку, то эта функция непрерывна в указанной точке. Следующий пример показывает, что это, вообще говоря, не так.

2°. Рассмотрим функцию

$$u = f(M) = \begin{cases} \dfrac{x^2y}{x^4+y^2} & \text{при} \quad x^4+y^2 \neq 0, \\ 0 & \text{при} \quad x^4+y^2 = 0. \end{cases}$$

Докажем, что, хотя указанная функция непрерывна на любой прямой, проходящей через точку $O(0,0)$, она не является непрерывной в этой точке. В самом деле, значения функции на прямой $y = kx$ равны $\dfrac{kx}{x^2+k^2}$, и поэтому при $x \to 0$ $u \to 0$. Непрерывность этой функции на оси Oy вытекает из того, что ее значения на этой оси равны нулю. С другой стороны, значения функции на параболе $y = px^2$ постоянны и равны $\dfrac{p}{1+p^2}$, и поэтому предельное значение функции при стремлении точки M к точке O по указанной параболе также равно $\dfrac{p}{1+p^2}$. Так как при $p \neq 0$ этот предел отличен от нуля и не совпадает с частным значением функции в точке O, то функция разрывна в этой точке.

2. Основные свойства непрерывных функций нескольких переменных. В этом пункте мы перечислим основные свойства непрерывных функций нескольких переменных. Поскольку доказательства этих свойств в основном аналогичны доказательствам соответствующих свойств функций одной переменной, то, как правило, мы будем давать лишь краткие пояснения, предоставляя детали доказательств читателю.

1°. Арифметические операции над непрерывными функциями. Справедливо следующее утверждение.

Пусть функции $f(M)$ и $g(M)$ непрерывны в точке A. Тогда функции $f(M)+g(M)$, $f(M)-g(M)$, $f(M)\cdot g(M)$ и $\frac{f(M)}{g(M)}$ непрерывны в точке A (частное при условии $g(A)\neq 0$). Доказательство этого утверждения совершенно аналогично доказательству теоремы 4.2.

2°. Непрерывность сложной функции. Введем понятие сложной функции нескольких переменных. Пусть функции

$$\begin{aligned} x_1 &= \varphi_1(t_1, t_2, \ldots, t_k), \\ x_2 &= \varphi_2(t_1, t_2, \ldots, t_k), \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots \\ x_m &= \varphi_m(t_1, t_2, \ldots, t_k) \end{aligned} \tag{14.11}$$

заданы на множестве $\{N\}$ евклидова пространства E^k ($t_1, t_2, \ldots, t_k$ — координаты точек в этом пространстве). Тогда каждой точке $N(t_1, t_2, \ldots, t_k)$ из множества $\{N\}$ ставится в соответствие с помощью формул (14.11) точка $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ евклидова пространства E^m. Обозначим через $\{M\}$ множество всех таких точек. Пусть $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ — функция m-переменных, заданная на указанном множестве $\{M\}$. В этом случае мы будем говорить, что на множестве $\{N\}$ евклидова пространства E^k определена *сложная функция* $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, где $x_1, x_2, \ldots, x_m$ являются функциями переменных $t_1, t_2, \ldots, t_k$, причем эти функции определяются соотношениями (14.11). Справедливо следующее утверждение.

Пусть $x_1 = \varphi_1(t_1, t_2, \ldots, t_k)$, $x_2 = \varphi_2(t_1, t_2, \ldots, t_k)$, ..., $x_m = \varphi_m(t_1, t_2, \ldots, t_k)$ непрерывны в точке $A(a_1, a_2, \ldots, a_k)$, а функция $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ непрерывна в точке $B(b_1, b_2, \ldots \ldots, b_m)$, где $b_i = \varphi_i(a_1, a_2, \ldots, a_k)$, $i = 1, 2, \ldots, m$. Тогда сложная функция $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, где $x_1, x_2, \ldots, x_m$ представляют собой определенные выше функции аргументов $t_1, t_2, \ldots, t_k$, непрерывна в точке $A(a_1, a_2, \ldots, a_k)$. Наме-

тим основные этапы доказательства этого утверждения. Пусть $\{N_n\}$, $N_n \neq A$, — произвольная сходящаяся к A последовательность точек из области $\{N\}$ задания функций $\varphi_i(t_1, t_2, \ldots, t_k)$, а $\{M_n\}$ — соответствующая последовательность точек, координаты $x_i^{(n)}$ которых равны $\varphi_i(t_1^{(n)}, t_2^{(n)}, \ldots, t_k^{(n)})$. В силу непрерывности функций φ_i в точке A, последовательность $\{M_n\}$ сходится к точке $B(b_1, b_2, \ldots, b_m)$ (не исключена возможность совпадения точек M_n с точкой B). В силу непрерывности в точке B функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, последовательность $\{f(M_n)\}$ сходится к $f(B)$. Но эта последовательность представляет собой последовательность значений сложной функции, отвечающую сходящейся к A последовательности $\{N_n\}$ точек области ее задания. Так как мы убедились, что последовательность $\{f(M_n)\}$ сходится к частному значению $f(B)$, то тем самым непрерывность сложной функции доказана.

З а м е ч а н и е. Приведенное здесь доказательство представляет собой обобщение на случай нескольких переменных доказательства теоремы 4.5 о непрерывности сложной функции одной переменной.

3°. Т е о р е м а о б у с т о й ч и в о с т и з н а к а н е п р е р ы в н о й ф у н к ц и и.

Теорема 14.4. *Если функция $u = f(M)$ непрерывна в точке A евклидова пространства E^m и если $f(A) \neq 0$, то существует такая δ-окрестность точки A, в пределах которой во всех точках области своего задания $f(M)$ не обращается в нуль и имеет знак, совпадающий со знаком $f(M)$.* Справедливость этой теоремы непосредственно вытекает из определения непрерывности функции в терминах «$\varepsilon - \delta$».

4°. Т е о р е м а о п р о х о ж д е н и и н е п р е р ы в н о й ф у н к ц и и ч е р е з л ю б о е п р о м е ж у т о ч н о е з н а ч е н и е.

Теорема 14.5. *Пусть функция $u = f(M)$ непрерывна во всех точках связного множества $\{M\}$ евклидова пространства E^m, причем $f(A)$ и $f(B)$ — значения этой функции в точках A и B этого множества. Пусть, далее, C — любое число, заключенное между $f(A)$ и $f(B)$. Тогда на любой непрерывной кривой L, соединяющей точки A и B и целиком располагающейся в $\{M\}$, найдется точка N такая, что $f(N) = C$.*

Д о к а з а т е л ь с т в о. Пусть

$$x_1 = \varphi_1(t), \quad x_2 = \varphi_2(t), \quad \ldots, \quad x_m = \varphi_m(t), \quad \alpha \leqslant t \leqslant \beta,$$

— уравнения непрерывной кривой L, соединяющей точки A и B множества $\{M\}$ и целиком располагающейся в $\{M\}$ (см. п. 5 § 1). На сегменте $[\alpha, \beta]$ определена сложная функция $u = f(x_1, x_2, \ldots$ $\ldots, x_m)$, где $x_i = \varphi_i(t)$, $i = 1, 2, \ldots, m$, $\alpha \leqslant t \leqslant \beta$. Очевидно,

значения этой функции на сегменте $[\alpha, \beta]$ совпадают со значениями функции $u = f(M)$ на кривой L. Указанная сложная функция одной переменной t, в силу утверждения раздела 2° этого пункта, непрерывна на сегменте $[\alpha, \beta]$ и, согласно теореме 8.6, в некоторой точке ξ сегмента $[\alpha, \beta]$ принимает значение C. Поэтому в точке N кривой L с координатами $\varphi_1(\xi)$, $\varphi_2(\xi)$, ..., $\varphi_m(\xi)$ справедливо равенство $f(N) = C$. Теорема доказана.

5°. Ограниченность функции, непрерывной на замкнутом ограниченном множестве.

Теорема 14.6 (первая теорема Вейерштрасса). *Если функция $u = f(M)$ непрерывна на замкнутом ограниченном множестве $\{M\}$, то она ограничена на этом множестве.* Остановимся на доказательстве ограниченности $u = f(M)$ сверху. Предположим, что $u = f(M)$ не ограничена сверху на $\{M\}$. Выделим (как и в доказательстве аналогичной теоремы 8.7) последовательность $\{M_n\}$ точек множества $\{M\}$, для которых $f(M_n) > n$. В силу теоремы Больцано–Вейерштрасса (см. п. 2 § 2) из $\{M_n\}$ можно выделить сходящуюся подпоследовательность $\{M_{k_n}\}$, предел M которой, в силу замечания к теореме Больцано–Вейерштрасса, принадлежит множеству $\{M\}$. Очевидно, последовательность $\{f(M_{k_n})\}$ бесконечно большая. С другой стороны, в силу непрерывности функции в точке M, эта последовательность $\{f(M_{k_n})\}$ должна сходиться к $f(M)$. Полученное противоречие доказывает теорему.

6°. Достижение функцией, непрерывной на замкнутом ограниченном множестве, своих точных граней.

Теорема 14.7 (вторая теорема Вейерштрасса). *Если функция $u = f(M)$ непрерывна на замкнутом ограниченном множестве $\{M\}$, то она достигает на этом множестве своих точных верхней и нижней граней.* Доказательство этой теоремы совершенно аналогично доказательству теоремы 8.8 (вторая теорема Вейерштрасса для функции одной переменной).

7°. Понятие равномерной непрерывности функции нескольких переменных. *Функция $u = f(M)$ называется равномерно непрерывной на множестве $\{M\}$* [1] *евклидова пространства E^m, если для любого положительного числа ε можно указать такое положительное δ, зависящее только от ε, что для любых двух точек M' и M'' множества $\{M\}$, удовлетворяющих условию $\rho(M', M'') < \delta$, выполняется неравенство $|f(M'') - f(M')| < \varepsilon$.* Имеет место следующая теорема.

---

[1]) При этом предполагается, что множество $\{M\}$ плотно в себе, т. е. в любой ε-окрестности каждой точки M этого множества имеются отличные от M точки множества $\{M\}$.

Теорема 14.8 (теорема о равномерной непрерывности). *Непрерывная на замкнутом ограниченном множестве $\{M\}$ функция равномерно непрерывна на этом множестве.* Доказательство этой теоремы совершенно аналогично доказательству теоремы 10.2 и получается из него путем замены термина «сегмент $[a, b]$» термином «множество $\{M\}$», замены буквы x на букву M и замены выражений типа $|x'' - x'|$ на символ $\rho(M', M'')$.

Замечание. Назовем *диаметром* ограниченного множества $\{M\}$ точную верхнюю грань чисел $\rho(M', M'')$, где M' и M'' — всевозможные точки множества $\{M\}$. Используя понятие диаметра множества, отметим следующее свойство непрерывных на замкнутых ограниченных множествах функций. *Пусть функция $u = f(M)$ непрерывна на замкнутом ограниченном множестве $\{M\}$. Тогда для любого положительного числа ε можно указать такое $\delta > 0$, что на каждом принадлежащем множеству $\{M\}$ замкнутом подмножестве $\{\overline{M}\}$, диаметр которого меньше δ, колебание ω*[1] *функции $f(M)$ меньше ε.* Доказательство этого свойства совершенно аналогично доказательству следствия из теоремы 10.2.

§ 4. Производные и дифференциалы функции нескольких переменных

1. Частные производные функции нескольких переменных. Пусть точка $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ является внутренней точкой области задания функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$. Рассмотрим в данной фиксированной точке $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ отношение частного приращения $\Delta_{x_k} u$ (см. п. 1 § 3, формулы (14.8) и (14.9)) к соответствующему приращению Δx_k аргумента x_k:

$$\frac{\Delta_{x_k} u}{\Delta x_k} = \frac{f(x_1, x_2, \ldots, x_{k-1}, x_k + \Delta x_k, x_{k+1}, \ldots, x_m) - f(x_1, x_2, \ldots, x_m)}{\Delta x_k}. \tag{14.12}$$

Отношение (14.12) представляет собой функцию от Δx_k, определенную для всех, отличных от нуля значений Δx_k, для которых точка $M(x_1, x_2, \ldots, x_{k-1}, x_k + \Delta x_k, x_{k+1}, \ldots, x_m)$ принадлежит области задания функции u.

Определение. *Если существует предел отношения* (14.12) *частного приращения $\Delta_{x_k} u$ функции в точке $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$*

[1]) Колебанием ω функции $f(M)$ на множестве $\{M\}$ называется разность между точной верхней и точной нижней гранями функции $f(M)$ на этом множестве.

к соответствующему приращению Δx_k аргумента x_k при $\Delta x_k \to 0$, то этот предел называется частной производной функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ в точке M по аргументу x_k и обозначается одним из следующих символов:

$$\frac{\partial u}{\partial x_k},\ \frac{\partial f}{\partial x_k},\ u'_{x_k},\ f'_{x_k}.$$

Таким образом,

$$\frac{\partial u}{\partial x_k} = \lim_{\Delta x_k \to 0} \frac{\Delta_{x_k} u}{\Delta x_k}. \tag{14.13}$$

Отметим, что частная производная функции $u = f(x_1, x_2, \ldots$ $\ldots, x_m)$ по аргументу x_k представляет собой обыкновенную производную функции одной переменной x_k при фиксированных значениях остальных переменных. Поэтому вычисление частных производных производится по обычным правилам вычисления производных функций одной переменной.

Примеры.

1°. $$u = \operatorname{arctg}\frac{x}{y},\ \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{y}{x^2+y^2},\ \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{-x}{x^2+y^2}.$$

2°. $$u = xe^{yz} + \ln(x-y+z),\ \frac{\partial u}{\partial x} = e^{yz} + \frac{1}{x-y+z},$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = xze^{yz} - \frac{1}{x-y+z},\ \frac{\partial u}{\partial z} = xye^{yz} + \frac{1}{x-y+z}.$$

3°. $$u = \operatorname{tg}\sqrt{x^2-yz},\ \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{x}{\sqrt{x^2-yz}\cos^2\sqrt{x^2-yz}},$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{z}{2\sqrt{x^2-yz}\cos^2\sqrt{x^2-yz}},\ \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{y}{2\sqrt{x^2-yz}\cos^2\sqrt{x^2-yz}}.$$

Замечание 1. Из существования у функции в данной точке всех частных производных, вообще говоря, не вытекает непрерывность функции в этой точке. Мы уже убедились, что функция

$$u = \begin{cases} \dfrac{xy}{x^2+y^2} & \text{при} \quad x^2+y^2 \neq 0, \\ 0 & \text{при} \quad x^2+y^2 = 0 \end{cases}$$

не является непрерывной в точке $O(0,0)$ (см. пример 1° п. 1 § 3). Однако в этой точке указанная функция имеет частные производные по x и y. Это следует из того, что $f(x,0) \equiv 0$ и $f(0,y) \equiv 0$, и поэтому

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{(0,0)} = 0 \quad \text{и} \quad \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{(0,0)} = 0.$$

Замечание 2. Мы определили понятие частных производных для внутренних точек области задания функции.

Для граничных точек области задания данное нами определение частных производных является, вообще говоря, непригодным. В частности, это связано с тем, что в граничных точках области задания функции не всегда можно вычислить частные приращения этой функции (так, например, обстоит дело с граничной точкой M_0 области, изображенной на рис. 14.2). Поэтому обычно частные производные в граничных точках области задания функции определяются как предельные значения этих производных.

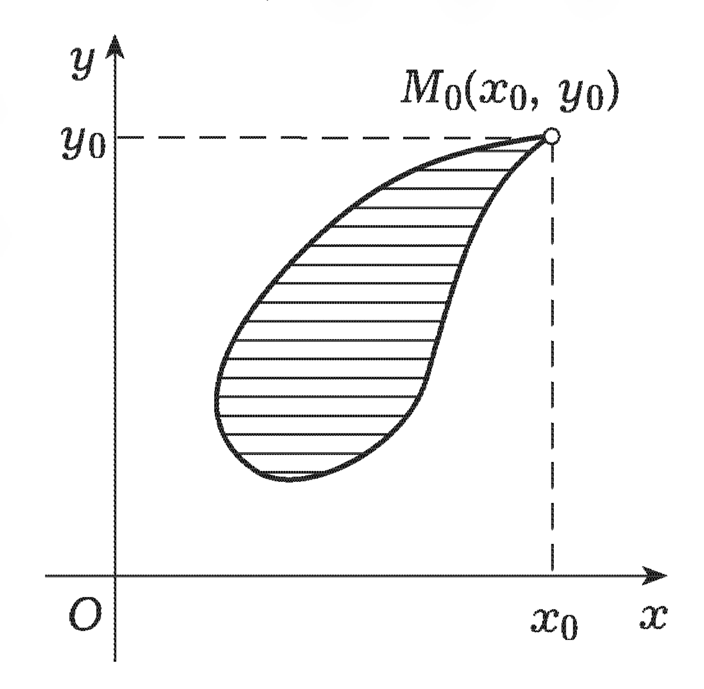


Рис. 14.2

2. Понятие дифференцируемости функции нескольких переменных. Напомним, что приращением (или полным приращением) функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ в точке $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, соответствующим приращениям Δx_1, Δx_2, ..., Δx_m аргументов, называется выражение

$$\Delta u = f(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \ldots, x_m + \Delta x_m) - f(x_1, x_2, \ldots, x_m).$$

Определение. *Функция $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ называется* д и ф ф е р е н ц и р у е м о й *в данной точке $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, если ее полное приращение в этой точке может быть представлено в виде*

$$\Delta u = A_1\Delta x_1 + A_2\Delta x_2 + \ldots$$
$$\ldots + A_m\Delta x_m + \alpha_1\Delta x_1 + \alpha_2\Delta x_2 + \ldots + \alpha_m\Delta x_m, \quad (14.14)$$

где $A_1, A_2, \ldots, A_m$ — некоторые не зависящие от Δx_1, $\Delta x_2, \ldots$ ..., Δx_m числа, а α_1, α_2, ..., α_m — бесконечно малые при $\Delta x_1 \to 0$, $\Delta x_2 \to 0$, ..., $\Delta x_m \to 0$ функции, равные нулю при $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \ldots = \Delta x_m = 0$. Соотношение (14.14) называется *условием дифференцируемости* функции в данной точке M. Условие (14.14) дифференцируемости функции можно записать также в иной форме. Для этого рассмотрим бесконечно малую при $\Delta x_1 \to 0$, $\Delta x_2 \to 0$, ..., $\Delta x_m \to 0$ функцию $\rho = \sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \ldots + \Delta x_m^2}$ [1]) и отметим, что эта функция обращается в нуль лишь при $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \ldots = \Delta x_m = 0$. Убедимся теперь, что входящая в правую часть соотношения (14.14) сумма $\alpha_1\Delta x_1 + \alpha_2\Delta x_2 + \ldots + \alpha_m\Delta x_m$ представляет собой бесконечно малую более высокого порядка функцию по сравнению с ρ.

[1]) Геометрически эта функция представляет собой расстояние между точками $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ и $M'(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \ldots, x_m + \Delta x_m)$.

Иными словами, убедимся, что эта сумма представляет собой выражение $o(\rho)$. В самом деле, при $\rho \neq 0$ справедливо $\dfrac{|\Delta x_i|}{\rho} \leqslant 1$, и поэтому

$$|\alpha_1 \Delta x_1 + \alpha_2 \Delta x_2 + \ldots + \alpha_m \Delta x_m| \leqslant \\ \leqslant \left\{ |\alpha_1| \frac{|\Delta x_1|}{\rho} + |\alpha_2| \frac{|\Delta x_2|}{\rho} + \ldots + |\alpha_m| \frac{|\Delta x_m|}{\rho} \right\} \rho \leqslant \\ \leqslant \{ |\alpha_1| + |\alpha_2| + \ldots + |\alpha_m| \} \rho = o(\rho).$$

Таким образом, условие (14.14) дифференцируемости функции может быть записано в следующей форме:

$$\Delta u = A_1 \Delta x_1 + A_2 \Delta x_2 + \ldots + A_m \Delta x_m + o(\rho). \tag{14.15}$$

При этом величину $o(\rho)$ мы считаем равной нулю при $\rho = 0$.

Чтобы доказать, что условие (14.15) эквивалентно условию (14.14), нужно убедиться, что из представления (14.15) в свою очередь вытекает представление (14.14). Для этой цели, считая, что не все Δx_1, Δx_2, ..., Δx_m равны нулю[1]), представим $o(\rho)$ в виде

$$o(\rho) = \frac{o(\rho)}{\rho} \frac{\rho^2}{\rho} = \frac{o(\rho)}{\rho} \frac{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \ldots + \Delta x_m^2}{\rho} = \\ \left[\frac{o(\rho)}{\rho} \frac{\Delta x_1}{\rho} \right] \Delta x_1 + \left[\frac{o(\rho)}{\rho} \frac{\Delta x_2}{\rho} \right] \Delta x_2 + \ldots + \left[\frac{o(\rho)}{\rho} \frac{\Delta x_m}{\rho} \right] \Delta x_m.$$

Полагая $\dfrac{o(\rho)}{\rho} \dfrac{\Delta x_i}{\rho} = \alpha_i$ и учитывая, что α_i является бесконечно малой при $\rho \to 0$ (а стало быть, и при $\Delta x_1 \to 0$, $\Delta x_2 \to 0$, ..., $\Delta x_m \to 0$) функцией, мы придем к представлению (14.14).

Итак, условие дифференцируемости функции можно записать как в виде (14.14), так и в виде (14.15).

Если хотя бы одно из чисел A_1, A_2, ..., A_m отлично от нуля, то сумма $A_1 \Delta x_1 + A_2 \Delta x_2 + \ldots + A_m \Delta x_m$ представляет собой *главную, линейную относительно приращений аргументов* часть приращения дифференцируемой функции. Отметим, что при определении понятия дифференцируемости функции мы не исключали возможности обращения всех чисел A_1, A_2, ..., A_m в нуль, и поэтому, если приращение Δu функции может быть представлено в виде (14.14) или (14.15) при $A_1 = A_2 = \ldots$ $\ldots = A_m = 0$, то функция дифференцируема в данной точке.

Справедлива следующая теорема.

---

[1]) Если все Δx_i равны нулю, то все члены в правой части формул (14.14) и (14.15) равны нулю.

Теорема 14.9. *Если функция $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ дифференцируема в точке $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, то в этой точке существуют частные производные по всем аргументам, причем $\dfrac{\partial u}{\partial x_i} = A_i$, где A_i определяются из условия* (14.14) *или* (14.15) *дифференцируемости функции.*

Доказательство. Из условия (14.14) дифференцируемости функции в точке $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ вытекает, что ее частное приращение $\Delta_{x_i} u$ в этой точке равно $\Delta_{x_i} u = A_i \Delta x_i + \alpha_i \Delta x_i$. Отсюда вытекает, что $\dfrac{\Delta_{x_i} u}{\Delta x_i} = A_i + \alpha_i$, и поэтому, так как $\alpha_i \to 0$ при $\Delta x_i \to 0$, $\lim\limits_{\Delta x_i \to 0} \dfrac{\Delta_{x_i} u}{\Delta x_i} = \dfrac{\partial u}{\partial x_i} = A_i$.

Следствие 1. *Условие* (14.15) *дифференцируемости функции в данной точке M можно записать в следующей форме*:

$$\Delta u = \frac{\partial u}{\partial x_1}\Delta x_1 + \frac{\partial u}{\partial x_2}\Delta x_2 + \ldots + \frac{\partial u}{\partial x_m}\Delta x_m + o(\rho)\ ^{1)}. \qquad (14.16)$$

Следствие 2. *Если функция $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ дифференцируема в точке $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, то представление ее приращения Δu в форме* (14.14) *или* (14.15) *единственно.* В самом деле, коэффициенты A_i этих представлений равны частным производным $\dfrac{\partial u}{\partial x_i}$ *в данной точке M* и поэтому определяются единственным образом.

Убедимся в справедливости следующего важного свойства дифференцируемых функций.

Если функция $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ дифференцируема в точке $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, то она и непрерывна в этой точке. В самом деле, из условия (14.14) дифференцируемости функции в точке вытекает, что $\lim\limits_{\substack{\Delta x_1 \to 0,\\ \Delta x_2 \to 0,\\ \ldots\ldots\\ \Delta x_m \to 0}} \Delta u = 0$, а это и означает, что функция непрерывна в точке M (см. п. 1 § 3, формула (14.7)).

В случае функции $u = f(x, y)$ двух переменных условие дифференцируемости может быть иллюстрировано геометрически. Введем понятие касательной плоскости к поверхности в точке N_0. *Плоскость π, проходящая через точку N_0 поверхности, называется* ***касательной плоскостью*** *в этой точке, если угол между этой плоскостью и секущей, проходящей через точку N_0 и любую точку N_1 поверхности, стремится к нулю, когда точка N_1 стремится к N_0* (рис. 14.3).

---

[1]) Здесь все частные производные $\dfrac{\partial u}{\partial x_i}$ берутся в данной точке M.

Если в точке N_0 существует касательная плоскость, то очевидно, что касательная в точке N_0 к любой кривой, расположенной на поверхности и проходящей через N_0, лежит в указанной плоскости.

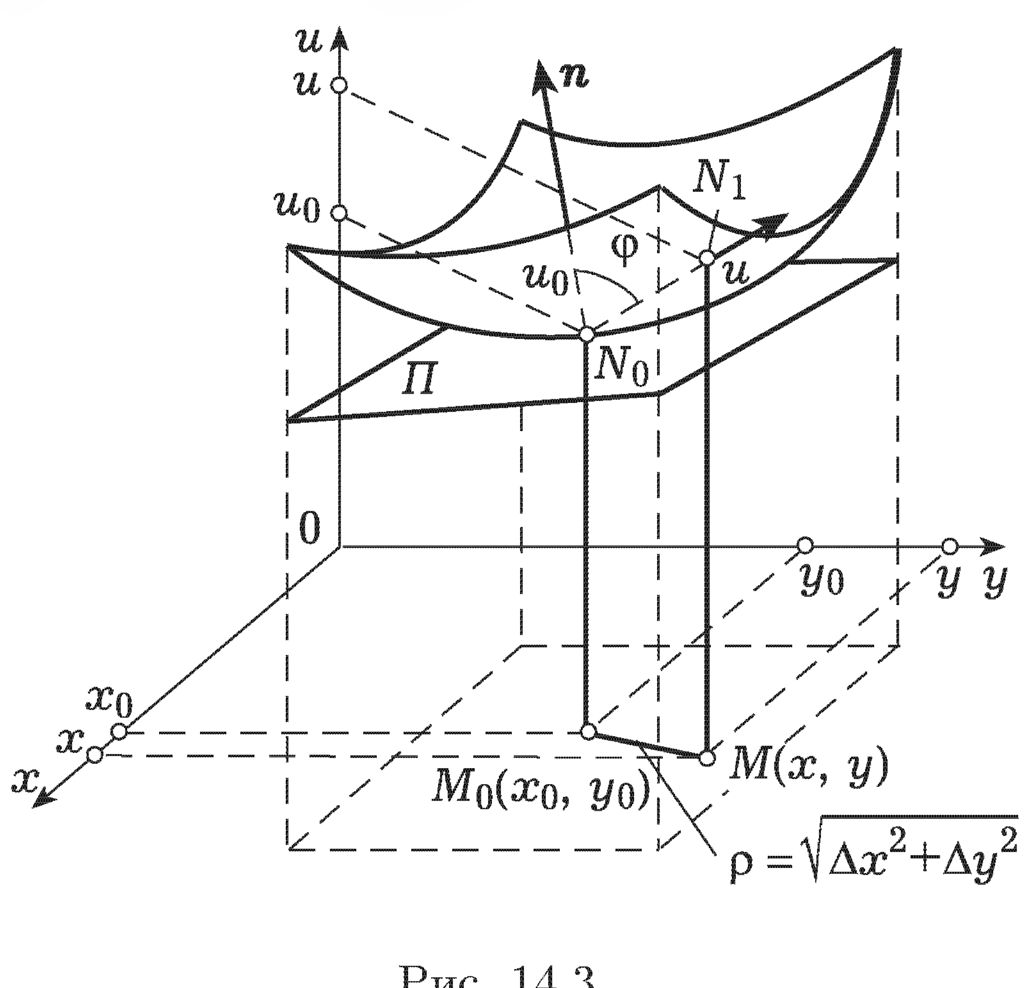


Рис. 14.3

Убедимся, что из условия дифференцируемости функции $u = f(x,y)$ в данной точке $M_0(x_0,y_0)$ вытекает существование касательной плоскости к графику S этой функции в точке $N_0(x_0,y_0,z_0)$. Положим $\Delta x = x - x_0$, $\Delta y = y - y_0$, $\Delta u = u - u_0$, где $u_0 = f(x_0,y_0)$, $u = f(x,y)$. Очевидно, условие (14.14) дифференцируемости в рассматриваемом случае можно записать следующим образом:

$$u - u_0 = A(x - x_0) + B(y - y_0) + \alpha\Delta x + \beta\Delta y = \\ = A(x - x_0) + B(y - y_0) + o(\rho),$$

где A и B — постоянные, равные частным производным $\dfrac{\partial u}{\partial x}$ и $\dfrac{\partial u}{\partial y}$ в точке M_0, а α и β — бесконечно малые при $\Delta x \to 0$ и $\Delta y \to 0$ функции, $\rho = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$.

Рассмотрим следующее уравнение:

$$U - u_0 = A(x - x_0) + B(y - y_0).$$

Из аналитической геометрии известно, что это уравнение определяет в декартовой системе координат (x,y,U) некоторую плоскость π, проходящую через точку $N_0(x_0,y_0,u_0)$ и имеющую нормальный вектор $\mathbf{n} = \{A, B, -1\}$ [1]).

Докажем, что эта плоскость π является касательной плоскостью в точке N_0 поверхности S. Для этого достаточно убедиться, что: 1) плоскость π проходит через точку N_0 поверхности S и 2) угол φ между нормалью $\mathbf{n}$ к этой плоскости и любой секущей N_0N_1 стремится к $\pi/2$, когда точка N_1 поверхности S стремится к точке N_0. Утверждение 1) очевидно. Перейдем к

[1]) Нормальным вектором плоскости называется любой ненулевой вектор $\mathbf{n}$, перпендикулярный к этой плоскости.

доказательству утверждения 2). Вычислим косинус угла φ, воспользовавшись известной формулой для косинуса угла между двумя векторами. Так как координаты вектора $\mathbf{n}$ равны A, B, -1, а координаты вектора $\overline{N_0N_1}$ секущей равны $x-x_0$, $y-y_0$, $u-u_0$ (см. рис. 14.3), то

$$\cos\varphi = \frac{A(x-x_0)+B(y-y_0)-(u-u_0)}{\sqrt{A^2+B^2+1}\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(u-u_0)^2}}.$$

Из условия дифференцируемости функции $u=f(x,y)$ вытекает, что

$$A(x-x_0)+B(y-y_0)-(u-u_0)=o(\rho).$$

Поэтому

$$|\cos\varphi| \leqslant \frac{|o(\rho)|}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}} = \frac{|o(\rho)|}{\rho}.$$

Из этой формулы вытекает, что $\lim\limits_{\rho\to 0}\cos\varphi = 0$, т. е. $\lim\limits_{\rho\to 0}\varphi = \pi/2$. Утверждение 2) доказано.

Таким образом, дифференцируемость функция $u=f(x,y)$ в точке $M_0(x_0,y_0)$ с геометрической точки зрения означает наличие касательной плоскости к графику функции $u=f(x,y)$ в точке $N_0(x_0,y_0,u_0)$.

Так как коэффициенты A и B равны соответственно частным производным, вычисленным в точке $M_0(x_0,y_0)$, то уравнение касательной плоскости может быть записано в виде

$$U-u_0 = \frac{\partial u}{\partial x}(x-x_0)+\frac{\partial u}{\partial y}(y-y_0). \tag{14.17}$$

Нормальный вектор $\mathbf{n} = \left\{\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, -1\right\}$ касательной плоскости принято называть *нормалью* к поверхности $u=f(x,y)$ в точке $N_0(x_0,y_0,u_0)$.

Выясним достаточные условия дифференцируемости функции нескольких переменных.

Теорема 14.10. *Если функция $u=f(x_1,x_2,\ldots,x_m)$ имеет частные производные по всем аргументам в некоторой окрестности точки $M_0(\overset{\circ}{x}_1,\overset{\circ}{x}_2,\ldots,\overset{\circ}{x}_m)$, причем все эти частные производные непрерывны в самой точке M_0, то указанная функция дифференцируема в точке M_0.*

Доказательство. Для сокращения записи проведем доказательство для функции двух переменных $u=f(x,y)$. Итак, пусть обе частные производные f'_x и f'_y существуют в окрестности точки $M_0(x_0,y_0)$ и непрерывны в этой точке. Дадим аргументам x и y столь малые приращения Δx и Δy, чтобы точка

$M(x_0+\Delta x, y_0+\Delta y)$ не выходила за пределы указанной окрестности точки M_0. Полное приращение $\Delta u = f(x_0+\Delta x, y_0+\Delta y) - f(x_0, y_0)$ можно записать в виде

$$\Delta u = [f(x_0+\Delta x, y_0+\Delta y) - f(x_0, y_0+\Delta y)] + [f(x_0, y_0+\Delta y) - f(x_0, y_0)].$$

Выражение $[f(x_0+\Delta x, y_0+\Delta y) - f(x_0, y_0+\Delta y)]$ можно рассматривать как приращение функции $f(x, y_0+\Delta y)$ одной переменной x на сегменте $[x_0, x_0+\Delta x]$. Поскольку функция $u = f(x,y)$ имеет частные производные, указанная функция $f(x, y_0+\Delta y)$ дифференцируема и ее производная по x представляет собой частную производную f'_x. Применяя к указанному приращению формулу Лагранжа, найдем такое θ_1 из интервала $0<\theta_1<1$, что

$$[f(x_0+\Delta x, y_0+\Delta y) - f(x_0, y_0+\Delta y)] = f'_x(x_0+\theta_1\Delta x, y_0+\Delta y)\Delta x.$$

Рассуждая совершенно аналогично, получим, что для некоторого θ_2 из интервала $0<\theta_2<1$,

$$[f(x_0, y_0+\Delta y) - f(x_0, y_0)] = f'_y(x_0, y_0+\theta_2\Delta y)\Delta y.$$

Так как производные f'_x и f'_y непрерывны в точке M_0, то

$$f'_x(x_0+\theta_1\Delta x, y_0+\Delta y) = f'_x(x_0, y_0) + \alpha,$$

$$f'_y(x_0, y_0+\theta_2\Delta y) = f'_y(x_0, y_0) + \beta,$$

где α и β — бесконечные малые при $\Delta x \to 0$ и $\Delta y \to 0$ функции. Отсюда, учитывая приведенные выражения для

$$[f(x_0+\Delta x, y_0+\Delta y) - f(x_0, y_0+\Delta y)] \text{ и } [f(x_0, y_0+\Delta y) - f(x_0, y_0]$$

и выражение для Δu, найдем

$$\Delta u = f'_x(x_0, y_0)\Delta x + f'_y(x_0, y_0)\Delta y + \alpha\Delta x + \beta\Delta y.$$

Следовательно, функция $u = f(x,y)$ дифференцируема в точке M_0. В случае функции m переменных $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ рассуждения проводятся аналогично, только полное приращение Δu этой функции следует представить в виде суммы

$$\Delta u = f(\overset{\circ}{x}_1+\Delta x_1, \ldots, \overset{\circ}{x}_m+\Delta x_m) - f(\overset{\circ}{x}_1, \ldots, \overset{\circ}{x}_m) = \sum_{k=1}^{m}[f(\overset{\circ}{x}_1, \ldots, \overset{\circ}{x}_{k-1}, \overset{\circ}{x}_k+\Delta x_k, \overset{\circ}{x}_{k+1}+\Delta x_{k+1}, \ldots, \overset{\circ}{x}_m+\Delta x_m) - f(\overset{\circ}{x}_1, \ldots, \overset{\circ}{x}_{k-1}, \overset{\circ}{x}_k, \overset{\circ}{x}_{k+1}+\Delta x_{k+1}, \ldots, \overset{\circ}{x}_m+\Delta x_m)].$$

Теорема доказана.

3. Понятие дифференциала функции нескольких переменных.

Определение. *Дифференциалом du дифференцируемой в точке $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ называется главная линейная относительно приращений аргументов часть приращения этой функции в точке M. Если все коэффициенты A_i в представлении (14.14) приращения дифференцируемой функции равны нулю, то дифференциал du функции в точке M считается равным нулю.*

Таким образом, дифференциалом du дифференцируемой в точке M функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ называется выражение

$$du = A_1\Delta x_1 + A_2\Delta x_2 + \ldots + A_m\Delta x_m. \tag{14.18}$$

Используя теорему 14.9, мы можем, очевидно, переписать выражение (14.18) для дифференциала du следующим образом:

$$du = \frac{\partial u}{\partial x_1}\Delta x_1 + \frac{\partial u}{\partial x_2}\Delta x_2 + \ldots + \frac{\partial u}{\partial x_m}\Delta x_m. \tag{14.19}$$

Введем понятие *дифференциала dx_i независимой переменной x_i*. Под дифференциалом dx_i независимой переменной x_i можно понимать любое (не зависящее от $x_1, x_2, \ldots, x_m$) число. Договоримся в дальнейшем брать это число равным приращению Δx_i независимой переменной x_i. Эта договоренность позволяет нам переписать формулу (14.19) в виде

$$du = \frac{\partial u}{\partial x_1}\,dx_1 + \frac{\partial u}{\partial x_2}\,dx_2 + \ldots + \frac{\partial u}{\partial x_m}\,dx_m. \tag{14.20}$$

Подчеркнем, что формула (14.20) установлена нами лишь для случая, когда аргументы $x_1, x_2, \ldots, x_m$ являются независимыми переменными. Однако ниже, в п. 5 этого параграфа, мы докажем, что формула (14.20) остается справедливой и для случая, когда аргументы $x_1, x_2, \ldots, x_m$ не являются независимыми переменными, а сами представляют собой дифференцируемые функции некоторых новых переменных.

4. Дифференцирование сложной функции. В этом пункте мы рассмотрим вопрос о дифференцировании сложной функции вида $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, где

$$\begin{aligned} x_1 &= \varphi_1(t_1, t_2, \ldots, t_k), \\ x_2 &= \varphi_2(t_1, t_2, \ldots, t_k), \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ x_m &= \varphi_m(t_1, t_2, \ldots, t_k). \end{aligned} \tag{14.21}$$

Мы докажем, что при определенных условиях эта сложная функция является дифференцируемой функцией своих аргу-

ментов $t_1, t_2, \ldots, t_k$. При этом частные производные указанной сложной функции по аргументам $t_1, t_2, \ldots, t_k$ выражаются через частные производные функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ и через частные производные функций (14.21) по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t_1} &= \frac{\partial u}{\partial x_1}\frac{\partial x_1}{\partial t_1} + \frac{\partial u}{\partial x_2}\frac{\partial x_2}{\partial t_1} + \ldots + \frac{\partial u}{\partial x_m}\frac{\partial x_m}{\partial t_1}, \\ \frac{\partial u}{\partial t_2} &= \frac{\partial u}{\partial x_1}\frac{\partial x_1}{\partial t_2} + \frac{\partial u}{\partial x_2}\frac{\partial x_2}{\partial t_2} + \ldots + \frac{\partial u}{\partial x_m}\frac{\partial x_m}{\partial t_2}, \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \frac{\partial u}{\partial t_k} &= \frac{\partial u}{\partial x_1}\frac{\partial x_1}{\partial t_k} + \frac{\partial u}{\partial x_2}\frac{\partial x_2}{\partial t_k} + \ldots + \frac{\partial u}{\partial x_m}\frac{\partial x_m}{\partial t_k}. \end{aligned} \qquad (14.22)$$

Докажем следующую *основную* теорему.

Теорема 14.11. *Пусть функции* (14.21) *дифференцируемы в некоторой точке* $M(\overset{\circ}{t}_1, \overset{\circ}{t}_2, \ldots, \overset{\circ}{t}_k)$, *а функция* $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ *дифференцируема в соответствующей точке* $N(\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_m)$, *где* $\overset{\circ}{x}_i = \varphi_i(\overset{\circ}{t}_1, \overset{\circ}{t}_2, \ldots, \overset{\circ}{t}_k)$, $i = 1, 2, \ldots, m$. *Тогда сложная функция* $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, *где* $x_1, x_2, \ldots, x_m$ *определяются соотношениями* (14.21), *дифференцируема в точке* M. *При этом частные производные этой сложной функции в точке* M *определяются формулами* (14.22), *в которых все частные производные* $\dfrac{\partial u}{\partial x_1}, \dfrac{\partial u}{\partial x_2}, \ldots, \dfrac{\partial u}{\partial x_m}$ *берутся в точке* N, *а все частные производные* $\dfrac{\partial x_i}{\partial t_l}$ *функции* (14.21) *по аргументам* $t_1, t_2, \ldots, t_k$ *берутся в точке* M.

Доказательство. Придадим аргументам $t_1, t_2, \ldots, t_k$ в точке $M(\overset{\circ}{t}_1, \overset{\circ}{t}_2, \ldots, \overset{\circ}{t}_k)$ произвольные приращения $\Delta t_1, \Delta t_2, \ldots, \Delta t_k$, не равные одновременно нулю. Этим приращениям соответствуют приращения $\Delta x_1, \Delta x_2, \ldots, \Delta x_m$ функций (14.21) в точке M. Приращениям $\Delta x_1, \Delta x_2, \ldots, \Delta x_m$ в свою очередь соответствует приращение Δu функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ в точке N. Поскольку функция $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ предполагается дифференцируемой в точке N, указанное приращение Δu этой функции может быть записано в виде

$$\Delta u = \frac{\partial u}{\partial x_1}\Delta x_1 + \frac{\partial u}{\partial x_2}\Delta x_2 + \ldots + \frac{\partial u}{\partial x_m}\Delta x_m + \\ + \alpha_1 \Delta x_1 + \alpha_2 \Delta x_2 + \ldots + \alpha_m \Delta x_m, \qquad (14.23)$$

где частные производные $\dfrac{\partial u}{\partial x_1}, \dfrac{\partial u}{\partial x_2}, \ldots, \dfrac{\partial u}{\partial x_m}$ берутся в точке N, а $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_m$ — бесконечно малые при $\Delta x_1 \to 0$, $\Delta x_2 \to 0 \ldots$,

$\ldots, \Delta x_m \to 0$ функции, равные нулю при $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \ldots$ $\ldots = \Delta x_m = 0$. Подчеркнем, что в соотношении (14.23) Δx_1, Δx_2, $\ldots$, Δx_m представляют собой приращения функций (14.21), отвечающие выбранным приращениям $\Delta t_1, \Delta t_2, \ldots, \Delta t_k$ аргументов этих функций. В силу дифференцируемости функций (14.21) в точке $M(\overset{\circ}{t}_1, \overset{\circ}{t}_2, \ldots, \overset{\circ}{t}_k)$ указанные приращения Δx_i, можно записать в следующей форме:

$$\Delta x_i = \frac{\partial x_i}{\partial t_1}\Delta t_1 + \frac{\partial x_i}{\partial t_2}\Delta t_2 + \ldots + \frac{\partial x_i}{\partial t_k}\Delta t_k + o(\rho), \qquad (14.24)$$

$$i = 1, 2, \ldots, m,$$

где частные производные $\dfrac{\partial x_i}{\partial t_1}, \dfrac{\partial x_i}{\partial t_2}, \ldots, \dfrac{\partial x_i}{\partial t_k}$ берутся в точке M, а $\rho = \sqrt{(\Delta t_1)^2 + (\Delta t_2)^2 + \ldots + (\Delta t_k)^2}$.

Мы должны убедиться в том, что после подстановки в правую часть (14.23) выражений (14.24) приращение Δu может быть приведено к виду

$$\Delta u = A_1 \Delta t_1 + A_2 \Delta t_2 + \ldots + A_k \Delta t_k + o(\rho), \qquad (14.25)$$

где

$$A_i = \frac{\partial u}{\partial x_1}\frac{\partial x_1}{\partial t_i} + \frac{\partial u}{\partial x_2}\frac{\partial x_2}{\partial t_i} + \ldots + \frac{\partial u}{\partial x_m}\frac{\partial x_m}{\partial t_i}, \quad i = 1, 2, \ldots, k. \quad (14.26)$$

Тем самым доказательство теоремы будет завершено, ибо формула (14.25) устанавливает факт дифференцируемости сложной функции, а выражение (14.26) представляет собой частную производную указанной сложной функции (см. теорему 14.9).

При подстановке в правую часть (14.23) выражений (14.24), кроме группы слагаемых $A_1 \Delta t_1 + A_2 \Delta t_2 + \ldots + A_k \Delta t_k$, мы получим и другие группы слагаемых. Нам нужно убедиться в том, что все другие группы слагаемых представляют собой величину $o(\rho)$. Это вытекает из следующих соображений:

1°. *Все частные производные* $\dfrac{\partial u}{\partial x_i}$ *в формуле* (14.23) *берутся в точке* N, *т. е. представляют собой постоянные числа, которые при умножении на* $o(\rho)$ *дают снова величину* $o(\rho)$.

2°. *Все* Δx_i $(i = 1, 2, \ldots, m)$ *удовлетворяют неравенству* $|\Delta x_i| \leqslant \mathrm{const}\,\rho$. *Это непосредственно вытекает из формул* (14.24).

3°. *Все* α_i *в формуле* (14.23) *представляют собой бесконечно малые при* $\rho \to 0$ *функции.* В самом деле, все α_i являются бесконечно малыми при $\Delta x_1 \to 0$, $\Delta x_2 \to 0$, $\ldots$, $\Delta x_m \to 0$. Но все функции (14.21) дифференцируемы, а стало быть, и непрерывны в точке M, и поэтому $\Delta x_1, \Delta x_2, \ldots, \Delta x_m$ стремятся к нулю при $\rho \to 0$.

4°. *Каждое произведение $\alpha_i \Delta x_i$ представляет собой величину $o(\rho)$.* Это непосредственно вытекает из пп. 2° и 3°. Теорема доказана.

Замечание. Рассмотрим важный частный случай, когда функции (14.21) зависят от одного аргумента t. Тогда мы имеем сложную функцию одной переменной t: $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, где $x_i = \varphi_i(t)$. Производная $\frac{du}{dt}$ этой сложной функции определяется следующей формулой:

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial x_1}\frac{dx_1}{dt} + \frac{\partial u}{\partial x_2}\frac{dx_2}{dt} + \ldots + \frac{\partial u}{\partial x_m}\frac{dx_m}{dt}. \tag{14.27}$$

Применим формулу (14.27) для доказательства *теоремы Эйлера об однородных функциях.*

Функция $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, заданная на множестве $\{M\}$, называется однородной функцией степени p на этом множестве, если для каждой точки $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ множества $\{M\}$ и для каждого числа t, для которого точка $N(tx_1, tx_2, \ldots, tx_m)$ принадлежит множеству $\{M\}$ *выполняется равенство*

$$f(tx_1, tx_2, \ldots, tx_m) = t^p f(x_1, x_2, \ldots, x_m). \tag{14.28}$$

Теорема 14.12 (теорема Эйлера об однородных функциях). *Если $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ является в некоторой области $\{M\}$ дифференцируемой однородной функцией степени p, то в каждой точке $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ области $\{M\}$ справедливо равенство*

$$\frac{\partial u}{\partial x_1}x_1 + \frac{\partial u}{\partial x_2}x_2 + \ldots + \frac{\partial u}{\partial x_m}x_m = pu. \tag{14.29}$$

Доказательство. Пусть $M_0(\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_m)$ — произвольная точка области $\{M\}$. Рассмотрим сложную функцию $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, где $x_i = t\,\overset{\circ}{x}_i$ $(i = 1, 2, \ldots, m)$, т. е. функцию $u = f(t\,\overset{\circ}{x}_1, t\,\overset{\circ}{x}_2, \ldots, t\,\overset{\circ}{x}_m)$. Так как при $t = 1$ функции $x_i = t\,\overset{\circ}{x}_i$ дифференцируемы и функция $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ дифференцируема в соответствующей точке M_0, то, согласно теореме 14.11 и замечанию к этой теореме, мы можем вычислить производную $\frac{du}{dt}$ указанной сложной функции в точке $t = 1$ по формуле (14.27). Так как $\frac{dx_i}{dt} = \overset{\circ}{x}_i$, то

$$\left.\frac{du}{dt}\right|_{t=1} = \frac{\partial u}{\partial x_1}\,\overset{\circ}{x}_1 + \frac{\partial u}{\partial x_2}\,\overset{\circ}{x}_2 + \ldots + \frac{\partial u}{\partial x_m}\,\overset{\circ}{x}_m, \tag{14.30}$$

где производные $\frac{\partial u}{\partial x_i}$ берутся в точке M_0. С другой стороны, в силу (14.28) рассматриваемая сложная функция может быть

представлена следующим образом:

$$u = f(t\overset{\circ}{x}_1, t\overset{\circ}{x}_2, \ldots, t\overset{\circ}{x}_m) = t^p f(\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_m). \tag{14.31}$$

Из (14.31) вытекает, что $\frac{du}{dt} = pt^{p-1} f(\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_m)$, т. е.

$$\left.\frac{du}{dt}\right|_{t=1} = pf(\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_m) = pu. \tag{14.32}$$

Сравнивая (14.30) и (14.32), мы получим соотношение (14.29) для точки M_0. Так как точка M_0 — произвольная точка области $\{M\}$, то теорема доказана.

5. Инвариантность формы первого дифференциала. В п. 3. мы ввели понятие первого дифференциала du функции нескольких переменных и установили, что когда аргументы $x_1, x_2, \ldots, x_m$ являются независимыми переменными, то дифференциал du можно представить в виде

$$du = \frac{\partial u}{\partial x_1}\, dx_1 + \frac{\partial u}{\partial x_2}\, dx_2 + \ldots + \frac{\partial u}{\partial x_m}\, dx_m. \tag{14.20}$$

В этом пункте мы докажем, что формула (14.20) является универсальной и справедлива также и в том случае, когда аргументы $x_1, x_2, \ldots, x_m$ сами являются дифференцируемыми функциями новых переменных $t_1, t_2, \ldots, t_k$. Указанное свойство первого дифференциала обычно называют свойством *инвариантности его формы*.

Пусть аргументы $x_1, x_2, \ldots, x_m$ функции $u = f(x_1, x_2, \ldots$ $\ldots, x_m)$ представляют собой дифференцируемые в точке $A(\overset{\circ}{t}_1, \overset{\circ}{t}_2, \ldots, \overset{\circ}{t}_k)$ функции $x_i = \varphi_i(t_1, t_2, \ldots, t_k)$, а сама функция $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ дифференцируема в точке $B(\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots$ $\ldots, \overset{\circ}{x}_m)$, где $\overset{\circ}{x}_i = \varphi_i(\overset{\circ}{t}_1, \overset{\circ}{t}_2, \ldots, \overset{\circ}{t}_k)$. В таком случае мы можем рассматривать u как сложную функцию аргументов $t_1, t_2, \ldots, t_k$, которая, в силу теоремы 14.11, является дифференцируемой в точке A. Поэтому дифференциал du этой сложной функции можно представить в виде

$$du = \frac{\partial u}{\partial t_1}\, dt_1 + \frac{\partial u}{\partial t_2}\, dt_2 + \ldots + \frac{\partial u}{\partial t_k}\, dt_k, \tag{14.33}$$

где $\frac{\partial u}{\partial t_i}$ определяются из соотношений (14.22). Подставляя $\frac{\partial u}{\partial t_i}$ из (14.22) в (14.33) и собирая коэффициенты при $\frac{\partial u}{\partial x_i}$, получим

$$du = \frac{\partial u}{\partial x_1}\left(\frac{\partial x_1}{\partial t_1}\, dt_1 + \frac{\partial x_1}{\partial t_2}\, dt_2 + \ldots + \frac{\partial x_1}{\partial t_k}\, dt_k\right) + \ldots$$
$$\ldots + \frac{\partial u}{\partial x_m}\left(\frac{\partial x_m}{\partial t_1}\, dt_1 + \frac{\partial x_m}{\partial t_2}\, dt_2 + \ldots + \frac{\partial x_m}{\partial t_k}\, dt_k\right).$$

Остается заметить, что в последнем соотношении коэффициент при $\dfrac{\partial u}{\partial x_i}$ равен дифференциалу dx_i функции $x_i = \varphi_i(t_1, t_2, \ldots$ $\ldots, t_k)$. Мы получим для дифференциала du сложной функции формулу (14.20), в которой дифференциалы dx_i будут дифференциалами функций $x_i = \varphi_i(t_1, t_2, \ldots, t_k)$. Инвариантность формы первого дифференциала установлена.

Свойство инвариантности формы первого дифференциала позволяет установить следующие *правила дифференцирования*. Пусть u и v — дифференцируемые функции каких-либо переменных. Тогда

$$d(cu) = c\,du \qquad (c = \text{const}),$$

$$d(u \pm v) = du \pm dv, \quad d(uv) = u\,dv + v\,du, \quad d\left(\frac{u}{v}\right) = \frac{v\,du - u\,dv}{v^2}.$$

(В последней из написанных формул v не обращается в нуль).

Докажем, например, справедливость третьей из указанных формул. Рассмотрим функцию $w = uv$ двух переменных u и v. Дифференциал этой функции dw равен

$$dw = \frac{\partial w}{\partial u}\,du + \frac{\partial w}{\partial v}\,dv.$$

Так как $\dfrac{\partial w}{\partial u} = v$ и $\dfrac{\partial w}{\partial v} = u$, то $dw = u\,dv + v\,du$. В силу инвариантности формы первого дифференциала выражение $u\,dv +$ $+\, v\,du$ будет дифференциалом функции uv и в случае, когда u и v сами являются дифференцируемыми функциями каких-либо переменных.

6. Производная по направлению. Градиент. Пусть функция $u = f(x, y, z)$ трех переменных x, y и z задана в некоторой окрестности точки $M_0(x_0, y_0, z_0)$. Рассмотрим некоторое направление, определяемое единичным вектором $\mathbf{a}$ с координатами $\cos\alpha$, $\cos\beta$, $\cos\gamma$ [1]). Проведем через точку M_0 ось $\mathbf{1}$, направление которой совпадает с направлением вектора $\mathbf{a}$, возьмем на этой оси произвольную точку $M(x, y, z)$ и обозначим через l величину направленного отрезка M_0M указанной оси [2]). Из аналитической геометрии известно, что координаты x, y, z точки M определяются равенствами

$$x = x_0 + l\cos\alpha, \quad y = y_0 + l\cos\beta, \quad z = z_0 + l\cos\gamma. \tag{14.34}$$

---

[1]) Из аналитической геометрии известно, что если единичный вектор $\mathbf{a}$ составляет с осями координат углы α, β, γ, то координаты этого вектора равны $\cos\alpha$, $\cos\beta$, $\cos\gamma$.

[2]) Величиной l направленного отрезка M_0M оси $\mathbf{1}$ называется число, равное его длине, взятой со знаком плюс, если направление этого отрезка совпадает с направлением оси $\mathbf{1}$, и со знаком минус, если направление этого отрезка противоположно направлению оси $\mathbf{1}$.

На указанной оси **1** функция $u = f(x, y, z)$, очевидно, является сложной функцией одной переменной величины l. *Если эта функция имеет в точке $l = 0$ производную по переменной l, то эта производная называется* п р о и з в о д н о й п о н а п р а в л е н и ю **1** *от функции $u = f(x, y, z)$ в точке M_0 и обозначается символом $\frac{\partial u}{\partial t}$.* Согласно замечанию к теореме 14.11, в случае дифференцируемости функции $u = f(x, y, z)$ в точке M_0 производная $\frac{\partial u}{\partial l}$ может быть вычислена по формуле (14.27), в которой аргумент t нужно заменить на l. Таким образом,

$$\frac{\partial u}{\partial l} = \frac{\partial u}{\partial x}\frac{dx}{dl} + \frac{\partial u}{\partial y}\frac{dy}{dl} + \frac{\partial u}{\partial z}\frac{dz}{dl}.$$

Так как $\frac{dx}{dl} = \cos\alpha$, $\frac{dy}{dl} = \cos\beta$, $\frac{dz}{dl} = \cos\gamma$, то из последней формулы находим

$$\frac{\partial u}{\partial l} = \frac{\partial u}{\partial x}\cos\alpha + \frac{\partial u}{\partial y}\cos\beta + \frac{\partial u}{\partial z}\cos\gamma. \tag{14.35}$$

Введем понятие *градиента* дифференцируемой в точке $M_0(x_0, y_0, z_0)$ функции $u = f(x, y, z)$.

Г р а д и е н т о м функции $u = f(x, y, z)$ в точке M_0 называется вектор, обозначаемый символом $\operatorname{grad} u$ *и имеющий координаты, соответственно равные производным $\frac{\partial u}{\partial x}$, $\frac{\partial u}{\partial y}$, $\frac{\partial u}{\partial z}$, взятым в точке M_0.* Таким образом,

$$\operatorname{grad} u = \left\{\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z}\right\}. \tag{14.36}$$

Используя понятие градиента функции и учитывая, что вектор $\mathbf{a}$, определяющий направление оси **1**, имеет координаты $\cos\alpha$, $\cos\beta$, $\cos\gamma$, представим выражение (14.35) для производной $\frac{\partial u}{\partial l}$ по направлению **1** в виде скалярного произведения векторов $\operatorname{grad} u$ и $\mathbf{a}$:

$$\frac{\partial u}{\partial l} = \mathbf{a} \operatorname{grad} u \text{ [1]}. \tag{14.37}$$

Покажем, что *градиент функции $u = f(x, y, z)$ в точке M_0 характеризует направление и величину максимального роста этой функции в точке M_0.* Именно, убедимся, что производная

[1]) Напомним, что скалярное произведение двух векторов, определяемое как произведение модулей (длин) векторов на косинус угла между ними, в случае, когда векторы заданы координатами, равно сумме произведений одноименных координат этих векторов.

функции u в точке M_0 по направлению, определяемому градиентом этой функции в указанной точке, имеет максимальное значение по сравнению с производной по любому другому направлению в точке M_0, а значение указанной производной равно $|\operatorname{grad} u|$, т. е. длине вектора $\operatorname{grad} u$. Перепишем формулу (14.37) в виде

$$\frac{\partial u}{\partial l} = |\mathbf{a}|\,|\operatorname{grad} u| \cos\varphi,$$

где φ — угол между векторами $\mathbf{a}$ и $\operatorname{grad} u$. Так как

$$|\mathbf{a}| = 1, \text{ то } \frac{\partial u}{\partial l} = |\operatorname{grad} u| \cos\varphi.$$

Из последней формулы вытекает, что максимальное значение $\left(\frac{\partial u}{\partial l}\right)_{\max}$ производной по направлению будет при $\cos\varphi = 1$, т. е. когда направление вектора $\mathbf{a}$ совпадает с направлением $\operatorname{grad} u$, при этом $\left(\frac{\partial u}{\partial l}\right)_{\max} = |\operatorname{grad} u|$.

Для выяснения геометрического смысла вектора $\operatorname{grad} u$ введем понятие *поверхности уровня* функции $u = f(x, y, z)$.

Назовем поверхностью уровня функции $u = f(x, y, z)$ каждую поверхность, на которой функция $u = f(x, y, z)$ сохраняет постоянное значение, $f(x, y, z) = c = \text{const}$.

Нетрудно убедиться в том, что вектор $\operatorname{grad} u$ в данной точке $M_0(x_0, y_0, z_0)$ ортогонален к той поверхности уровня функции $u = f(x, y, z)$, которая проходит через данную точку M_0.

З а м е ч а н и е. В случае функции $u = f(x, y)$ двух переменных x и y единичный вектор $\mathbf{a}$, определяющий направление в точке M_0, имеет координаты $\cos\alpha$ и $\sin\alpha$. Поэтому в указанном случае формула (14.35) принимает вид

$$\frac{\partial u}{\partial l} = \frac{\partial u}{\partial x}\cos\alpha + \frac{\partial u}{\partial y}\sin\alpha.$$

Отметим, что в случае функции двух переменных градиент дифференцируемой функции $u(x, y)$ определяется как вектор, имеющий координаты $\frac{\partial u}{\partial x}$ и $\frac{\partial u}{\partial y}$. Формула (14.37), очевидно, справедлива и в случае двух переменных. Для функции $u = f(x_1, x_2, \ldots$ $\ldots, x_m)$ m переменных $x_1, x_2, \ldots, x_m$ производная по направлению и градиент определяются аналогично. Именно, производная $\frac{\partial u}{\partial l}$ в точке $M_0(\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_m)$ по направлению $\mathbf{1}$, которое задается единичным вектором $\mathbf{a} = \{\cos\alpha_1, \cos\alpha_2, \ldots, \cos a_m\}$ [1]),

---

[1]) В аналитической геометрии m-мерного евклидова пространства единичный вектор $\mathbf{a}$ определяется как вектор с координатами $\cos\alpha_1, \cos\alpha_2, \ldots$ $\ldots, \cos\alpha_m$, где $\cos^2\alpha_1 + \cos^2 a_2 + \ldots + \cos^2\alpha_m = 1$.

определяется как производная по l сложной функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, где $x_1 = \overset{\circ}{x}_1 + l\cos\alpha_1$, $x_2 = \overset{\circ}{x}_2 + l\cos\alpha_2$, … …, $x_m = \overset{\circ}{x}_m + l\cos\alpha_m$. В случае, если $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ — дифференцируемая функция, для производной по направлению имеет место формула

$$\frac{\partial u}{\partial l} = \frac{\partial u}{\partial x_1}\cos\alpha_1 + \frac{\partial u}{\partial x_2}\cos\alpha_2 + \ldots + \frac{\partial u}{\partial x_m}\cos\alpha_m.$$

Градиентом функции в данной точке $M_0(\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_m)$ называется вектор, обозначаемый символом $\operatorname{grad} u$ и имеющий координаты $\frac{\partial u}{\partial x_1}, \frac{\partial u}{\partial x_2}, \ldots, \frac{\partial u}{\partial x_m}$, причем указанные производные берутся в точке M_0. Для производной по направлению дифференцируемой функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ справедлива формула (14.37).

§ 5. Частные производные и дифференциалы высших порядков

1. Частные производные высших порядков. Пусть частная производная $\frac{\partial u}{\partial x_i}$ по аргументу x_i функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, определенной в области $\{M\}$, существует в каждой точке области $\{M\}$. В этом случае указанная частная производная представляет собой функцию переменных $x_1, x_2, \ldots, x_m$, также определенную в области $\{M\}$. Может случиться, что эта функция $\frac{\partial u}{\partial x_i}$ имеет частную производную по аргументу x_k в некоторой точке M области $\{M\}$. Тогда указанную частную производную по аргументу x_k называют второй частной производной или частной производной второго порядка функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ в точке M сначала по аргументу x_i, а затем по аргументу x_k и обозначают одним из следующих символов:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x_k \partial x_i},\ f^{(2)}_{x_i x_k},\ u^{(2)}_{x_i x_k}.$$

При этом, если $i \neq k$, то частная производная $\frac{\partial^2 u}{\partial x_k \partial x_i}$ называется *смешанной* частной производной второго порядка. После того как введено понятие второй частной производной, можно последовательно ввести понятие третьей частной производной, затем четвертой и т. д. Если предположить, что нами уже введено понятие $(n-1)$-й частной производной функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ по аргументам $x_{i_1}, x_{i_2}, \ldots, x_{i_{n-1}}$ (отдельные или даже все номера которых могут совпадать) и что

эта $(n-1)$-я частная производная имеет в точке M частную производную по аргументу x_{i_n}, то указанную частную производную называют n-й частной производной (или частной производной n-го порядка) функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ в точке M по аргументам $x_{i_1}, x_{i_2}, \ldots, x_{i_{n-1}}, x_{i_n}$. Таким образом, мы вводим понятие n-й частной производной *индуктивно*, переходя от первой частной производной к последующим. Соотношение, определяющее n-ю частную производную по аргументам $x_{i_1}, x_{i_2}, \ldots, x_{i_{n-1}}, x_{i_n}$, имеет вид

$$\frac{\partial^n u}{\partial x_{i_n} \partial x_{i_{n-1}} \ldots \partial x_{i_2} \partial x_{i_1}} = \frac{\partial}{\partial x_{i_n}} \left(\frac{\partial^{n-1} u}{\partial x_{i_{n-1}} \ldots \partial x_{i_2} \partial x_{i_1}} \right).$$

Если не все индексы $i_1, i_2, \ldots, i_n$ совпадают между собой, то частная производная $\dfrac{\partial^n u}{\partial x_{i_n} \ldots \partial x_{i_2} \partial x_{i_1}}$ называется *смешанной* частной производной n-го порядка. Так как частная производная функции по аргументу x_i определяется как обыкновенная производная функции одной переменной x_i при фиксированных значениях остальных переменных, то методика вычисления частных производных высших порядков предполагает умение вычислять только обыкновенные производные первого порядка. В качестве примера вычислим частные производные второго порядка функции $u = \operatorname{arctg} \dfrac{x}{y}$. Имеем

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{y}{x^2+y^2}, \qquad \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{x}{x^2+y^2},$$
$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = -\frac{2xy}{(x^2+y^2)^2}, \qquad \frac{\partial^2 u}{\partial x\, \partial y} = \frac{x^2-y^2}{(x^2+y^2)^2},$$
$$\frac{\partial^2 u}{\partial y\, \partial x} = \frac{x^2-y^2}{(x^2+y^2)^2}, \qquad \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{2xy}{(x^2+y^2)^2}.$$

В рассмотренном примере смешанные частные производные $\dfrac{\partial^2 u}{\partial y\, \partial x}$ и $\dfrac{\partial^2 u}{\partial x\, \partial y}$ равны друг другу. Вообще говоря, значения смешанных производных зависят от порядка, в котором производятся последовательные дифференцирования. Убедимся, например, что смешанные частные производные $\dfrac{\partial^2 u}{\partial y\, \partial x}$ и $\dfrac{\partial^2 u}{\partial x\, \partial y}$ функции

$$u = \begin{cases} xy\dfrac{x^2-y^2}{x^2+y^2} & \text{при} \quad x^2+y^2 \neq 0, \\ 0 & \text{при} \quad x^2+y^2 = 0 \end{cases}$$

в точке $(0,0)$ существуют, но не равны друг другу. Действительно,

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \begin{cases} \dfrac{y(x^4-y^4+4x^2y^2)}{(x^2+y^2)^2} & \text{при} \quad x^2+y^2 \neq 0, \\ 0 & \text{при} \quad x^2+y^2 = 0. \end{cases}$$

Поэтому

$$\left.\frac{\partial^2 u}{\partial y\,\partial x}\right|_{x=0,\,y=0} = \lim_{y\to 0} \frac{\left.\dfrac{\partial u}{\partial x}\right|_{x=0,\,y\neq 0} - \left.\dfrac{\partial u}{\partial x}\right|_{x=0,\,y=0}}{y} = -1.$$

Проводя аналогичные вычисления, получим $\left.\dfrac{\partial^2 u}{\partial x\,\partial y}\right|_{x=0,\,y=0} = 1$.

Таким образом, в точке $(0,0)$ $\dfrac{\partial^2 u}{\partial x\,\partial y} \neq \dfrac{\partial^2 u}{\partial y\,\partial x}$. Выясним достаточные условия независимости значений смешанных производных от порядка, в котором производятся последовательные дифференцирования. Предварительно введем понятие n раз дифференцируемой функции нескольких переменных. *Функция $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ называется n раз дифференцируемой в точке $M_0(\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_m)$, если все частные производные $(n-1)$-го порядка этой функции являются дифференцируемыми функциями в точке M_0.* Отметим следующее утверждение. *Для того чтобы функция $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ была n раз дифференцируемой в точке $M_0(\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_m)$, достаточно, чтобы все ее частные производные n-го порядка были непрерывными в точке M_0.* Справедливость этого утверждения вытекает из определения дифференцируемости функции и теоремы 14.10 о достаточных условиях дифференцируемости.

Теорема 14.13. *Пусть функция $u = f(x, y)$ дважды дифференцируема в точке $M_0(x_0, y_0)$. Тогда в этой точке частные производные $f_{xy}^{(2)}$ и $f_{yx}^{(2)}$ равны.*

Доказательство. Так как функция $u = f(x, y)$ дважды дифференцируема в точке $M_0(x_0, y_0)$, то частные производные f'_x и f'_y определены в некоторой окрестности точки M_0 и представляют собой дифференцируемые функции в этой точке. Рассмотрим выражение

$$\Phi = f(x_0 + h, y_0 + h) - f(x_0 + h, y_0) - f(x_0, y_0 + h) + f(x_0, y_0), \tag{14.38}$$

где h — любое столь малое число, что точка $M(x_0 + h, y_0 + h)$ находится в указанной окрестности точки M_0. Выражение Φ можно рассматривать как приращение $\Delta\varphi = \varphi(x_0 + h) - \varphi(x_0)$ дифференцируемой на сегменте $[x_0, x_0 + h]$ функции $\varphi(x) = f(x, y_0 + h) - f(x, y_0)$ одной переменной x. Поэтому по формуле Лагранжа, обозначая через θ некоторое число из интервала $0 < \theta < 1$,

можем записать

$$\Phi = \Delta\varphi = \varphi'(x_0+\theta h)h = [f'_x(x_0+\theta h, y_0+h) - f'_x(x_0+\theta h, y_0)]h =$$
$$= \{[f'_x(x_0+\theta h, y_0+h) - f'_x(x_0, y_0)] - [f'_x(x_0+\theta h, y_0) - f'_x(x_0, y_0)]\}h. \tag{14.39}$$

Так как частная производная f'_x является дифференцируемой в точке M_0 функцией, то

$$[f'_x(x_0+\theta h, y_0+h) - f'_x(x_0, y_0)] =$$
$$= f^{(2)}_{xx}(x_0, y_0)\theta h + f^{(2)}_{xy}(x_0, y_0)h + \alpha_1\theta h + \beta_1 h,$$

$$[f'_x(x_0+\theta h, y_0) - f'_x(x_0, y_0)] = f^{(2)}_{xx}(x_0, y_0)\theta h + \alpha_2\theta h,$$

где α_1, β_1 и α_2 — бесконечно малые при $h \to 0$ функции. Подставляя найденные выражения для $[f'_x(x_0+\theta h, y_0+h) - f'_x(x_0, y_0)]$ и $[f'_x(x_0+\theta h, y_0) - f'_x(x_0, y_0)]$ в формулу (14.39), получим

$$\Phi = [f^{(2)}_{xy}(x_0, y_0) + \alpha]h^2, \tag{14.40}$$

где $\alpha = \alpha_1\theta + \beta_1 - \alpha_2\theta$ — бесконечно малая при $h \to 0$ функция. С другой стороны, выражение Φ, определяемое (14.38), можно рассматривать как приращение $\Delta\psi = \psi(y_0+h) - \psi(y_0)$ дифференцируемой на сегменте $[y_0, y_0+h]$ функции $\psi(y) = f(x_0+h, y) - f(x_0, y)$. Применяя формулу Лагранжа и учитывая дифференцируемость частной производной f'_y в точке M_0, мы получим совершенно аналогично предыдущему следующее выражение для Φ:

$$\Phi = [f^{(2)}_{yx}(x_0, y_0) + \beta]h^2, \tag{14.41}$$

где β — бесконечно малая при $h \to 0$ функция. Приравнивая правые части соотношений (14.40) и (14.41) и сокращая обе части полученного равенства на h^2, найдем, что $f^{(2)}_{xy}(x_0, y_0) + \alpha = f^{(2)}_{yx}(x_0, y_0) + \beta$. Так как α и β — бесконечно малые при $h \to 0$ функции, то из последнего равенства следует, что $f^{(2)}_{xy}(x_0, y_0) = f^{(2)}_{yx}(x_0, y_0)$. Теорема доказана.

Замечание. Теорема 14.13 утверждает, что в данной точке $M_0(x_0, y_0)$ имеет место равенство $f^{(2)}_{xy} = f^{(2)}_{yx}$, если в этой точке дифференцируемы f'_x и f'_y. Из дифференцируемости f'_x и f'_y в точке M_0 вытекает существование в *этой точке всех* частных производных второго порядка. Однако равенство $f^{(2)}_{xy} = f^{(2)}_{yx}$ имеет место и при условии существования лишь производных $f^{(2)}_{xy}$ и $f^{(2)}_{yx}$, но при дополнительном требовании непрерывности

этих производных в рассматриваемой точке. Именно, справедливо следующее утверждение.

Пусть в некоторой окрестности точки $M_0(x_0, y_0)$ функция $u = f(x, y)$ имеет частные производные f'_x, f'_y, $f^{(2)}_{xy}$, $f^{(2)}_{yx}$. Пусть, кроме того, производные $f^{(2)}_{xy}$ и $f^{(2)}_{yx}$ непрерывны в точке M_0. Тогда в этой точке $f^{(2)}_{xy} = f^{(2)}_{yx}$.

Для доказательства воспользуемся выражением Φ, определенным соотношением (14.38). Из (14.39) вытекает, что Φ представляет собой умноженную на h разность значений функции $f'_x(x, y)$ в точках $(x_0 + \theta h, y_0 + h)$ и $(x_0 + \theta h, y_0)$. Применяя к этой разности формулу Лагранжа конечных приращений по переменной y на сегменте $[y_0, y_0 + h]$, получим

$$\Phi = f^{(2)}_{xy}(x_0 + \theta h, y_0 + \theta_1 h)h^2, \quad \text{где} \quad 0 < \theta_1 < 1.$$

В силу непрерывности $f^{(2)}_{xy}$ в точке $M_0(x_0, y_0)$, из последнего равенства получаем

$$\Phi = \left[f^{(2)}_{xy}(x_0, y_0) + \alpha(h)\right] h^2,$$

где $\alpha(h) \to 0$ при $h \to 0$.

С другой стороны, эта же величина Φ представляет собой умноженную на h разность значений функции $f'_y(x, y)$ в точках $(x_0 + h, y_0 + \theta_2 h)$ и $(x_0, y_0 + \theta_2 h)$. Применяя к этой разности формулу Лагранжа конечных приращений по переменной x на сегменте $[x_0, x_0 + h]$ и учитывая непрерывность $f^{(2)}_{yx}$ в точке $M_0(x_0, y_0)$, получим

$$\Phi = \left[f^{(2)}_{yx}(x_0, y_0) + \beta(h)\right] h^2,$$

где $\beta(h) \to 0$ при $h \to 0$.

Приравнивая последние два выражения для Φ и рассуждая так же, как и в конце доказательства теоремы 14.13, мы убедимся в справедливости нужного нам равенства

$$f^{(2)}_{xy}(x_0, y_0) = f^{(2)}_{yx}(x_0, y_0).$$

Докажем теперь теорему о независимости значения любой смешанной частной производной n-го порядка от порядка, в котором производятся последовательные дифференцирования.

Теорема 14.14. *Пусть функция $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ n раз дифференцируема в точке $M_0(\mathring{x}_1, \mathring{x}_2, \ldots, \mathring{x}_m)$. Тогда в этой точке значение любой смешанной частной производной n-го порядка не зависит от порядка, в котором производятся последовательные дифференцирования.*

Доказательство. Очевидно, достаточно доказать независимость значения любой n-й смешанной производной от порядка проведения *двух последовательных* дифференцирований. Иными словами, достаточно доказать равенство

$$\frac{\partial^n u}{\partial x_{i_n} \ldots \partial x_{i_{k+1}} \partial x_{i_k} \ldots \partial x_{i_1}} = \frac{\partial^n u}{\partial x_{i_n} \ldots \partial x_{i_k} \partial x_{i_{k+1}} \ldots \partial x_{i_1}}. \tag{14.42}$$

Рассмотрим функцию $\dfrac{\partial^{k-1} u}{\partial x_{i_{k-1}} \ldots \partial x_{i_1}}$. Эта функция представляет собой дважды дифференцируемую функцию переменных x_{i_k} и $x_{i_{k+1}}$. Поэтому, в силу теоремы 14.13,

$$\frac{\partial^{k+1} u}{\partial x_{i_{k+1}} \partial x_{i_k} \partial x_{i_{k-1}} \ldots \partial x_{i_1}} = \frac{\partial^{k+1} u}{\partial x_{i_k} \partial x_{i_{k+1}} \partial x_{i_{k-1}} \ldots \partial x_{i_1}}.$$

Отсюда и вытекает справедливость равенства (14.42). Теорема доказана.

Отметим, что в случае n раз дифференцируемой в точке M_0 функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ любую ее частную производную n-го порядка можно записать в виде

$$\frac{\partial^n u}{\partial x_1^{\alpha_1} \partial x_2^{\alpha_2} \ldots \partial x_m^{\alpha_m}},$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_m$ — целые числа, удовлетворяющие условиям $0 \leqslant \alpha_i \leqslant n$, $\alpha_1 + \alpha_2 + \ldots + \alpha_m = n$.

2. Дифференциалы высших порядков. Выше мы использовали для обозначения дифференциалов аргументов функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ и для обозначения дифференциала самой этой функции символы $dx_1, dx_2, \ldots, dx_m$ и du соответственно.

Теперь нам придется использовать для обозначения дифференциалов аргументов указанной функции и дифференциала самой этой функции и другие символы. В частности, мы будем обозначать дифференциалы аргументов функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ и дифференциал самой этой функции символами $\delta x_1, \delta x_2, \ldots, \delta x_m$ и δu соответственно. В этих обозначениях инвариантное по форме выражение для первого дифференциала этой функции (14.20) (см. п. 5 § 4) будет иметь вид

$$\delta u = \frac{\partial u}{\partial x_1} \delta x_1 + \frac{\partial u}{\partial x_2} \delta x_2 + \ldots + \frac{\partial u}{\partial x_m} \delta x_m.$$

Возвращаясь к прежним обозначениям, рассмотрим выражение (14.20) для первого дифференциала дифференцируемой в данной точке $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$:

$$du = \frac{\partial u}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial u}{\partial x_2} dx_2 + \ldots + \frac{\partial u}{\partial x_m} dx_m. \tag{14.20}$$

Предположим, что величина, стоящая в правой части (14.20), представляет собой функцию аргументов $x_1, x_2, \ldots, x_m$, дифференцируемую в данной точке $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$. Для этого достаточно потребовать, чтобы функция $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ была два раза дифференцируема в данной точке $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, а аргументы $x_1, x_2, \ldots, x_m$ являлись либо независимыми переменными, либо два раза дифференцируемыми функциями некоторых независимых переменных.

При этих предположениях мы можем рассмотреть дифференциал

$$\delta(du) = \delta\left[\sum_{k=1}^{m} \frac{\partial u}{\partial x_k}\, dx_k\right]$$

от величины (14.20).

Определение 1. *Значение $\delta(du)$ дифференциала от первого дифференциала* (14.20), *взятое при $\delta x_1 = dx_1$, $\delta x_2 = dx_2$, ..., $\delta x_m = dx_m$, называется* в т о р ы м д и ф ф е р е н ц и а л о м *функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ (в данной точке $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$) и обозначается символом d^2u.*

Итак, по определению [1])

$$d^2u = \delta(du)\Big|_{\substack{\delta x_1 = dx_1,\\ \delta x_2 = dx_2,\\ \ldots\ldots\\ \delta x_m = dx_m}} = \left\{\delta\left[\sum_{k=1}^{m} \frac{\partial u}{\partial x_k}\, dx_k\right]\right\}\Bigg|_{\substack{\delta x_1 = dx_1,\\ \delta x_2 = dx_2,\\ \ldots\ldots\\ \delta x_m = dx_m}}.$$

Дифференциал $d^n u$ любого порядка n введем п о и н д у к ц и и.

Предположим, что уже введен дифференциал $d^{n-1}u$ порядка $n-1$ и что функция $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ n раз дифференцируема в данной точке $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, а ее аргументы $x_1, x_2, \ldots, x_m$ являются либо независимыми переменными, либо n раз дифференцируемыми функциями некоторых независимых переменных $t_1, t_2, \ldots, t_k$.

Определение 2. *Значение $\delta(d^{n-1}u)$ дифференциала от $(n-1)$-го дифференциала $d^{n-1}u$, взятое при $\delta x_1 = dx_1$, $\delta x_2 = dx_2$, ..., $\delta x_m = dx_m$, называется* n-м д и ф ф е р е н ц и а л о м *функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ (в данной точке $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$) и обозначается символом $d^n u$.*

Итак, по определению

$$d^n u = \delta(d^{n-1}u)\Big|_{\substack{\delta x_1 = dx_1,\\ \delta x_2 = dx_2,\\ \ldots\ldots\\ \delta x_m = dx_m}}.$$

При вычислении второго и последующих дифференциалов приходится существенно различать два случая: 1) случай, когда аргументы $x_1, x_2, \ldots, x_m$ являются независимыми переменными; 2) случай, когда аргументы $x_1, x_2, \ldots, x_m$ являются соот-

---

[1]) Символ $\{\ \ \}\Big|_{\substack{\delta x_1 = dx_1,\\ \delta x_2 = dx_2,\\ \ldots\ldots\\ \delta x_m = dx_m}}$ обозначает, что в выражении, заключенном в фигурные скобки, следует положить $\delta x_1 = dx_1$, $\delta x_2 = dx_2$, ..., $\delta x_m = dx_m$.

ветствующее число раз дифференцируемыми функциями некоторых независимых переменных $t_1, t_2, \ldots, t_k$.

Рассмотрим сначала первый случай. Если $x_1, x_2, \ldots, x_m$ являются независимыми переменными, то мы имеем право считать, что $dx_1, dx_2, \ldots, dx_m$ не зависят от $x_1, x_2, \ldots, x_m$.

Каждый дифференциал dx_k мы можем взять равным одному и тому же приращению Δx_k для всех точек $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$. При этом мы получим, что

$$\delta(dx_k) = \sum_{i=1}^{m} \frac{\partial(dx_k)}{\partial x_i} \delta x_i = 0.$$

Последнее соотношение и правила дифференцирования, установленные в конце п. 5 § 4, позволяют нам записать для два раза дифференцируемой в данной точке M функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ следующую цепочку равенств:

$$\begin{aligned} d^2u &= \delta(du)\Big|_{\substack{\delta x_1 = dx_1, \\ \ldots\ldots \\ \delta x_m = dx_m}} = \delta\left[\sum_{k=1}^{m} \frac{\partial u}{\partial x_k}\, dx_k\right]\Bigg|_{\substack{\delta x_1 = dx_1, \\ \ldots\ldots \\ \delta x_m = dx_m}} = \\ &= \sum_{k=1}^{m} \delta\left[\frac{\partial u}{\partial x_k}\, dx_k\right]\Bigg|_{\substack{\delta x_1 = dx_1, \\ \ldots\ldots \\ \delta x_m = dx_m}} = \sum_{k=1}^{m}\left\{dx_k \cdot \delta\left(\frac{\partial u}{\partial x_k}\right) + \right. \\ &\left. + \frac{\partial u}{\partial x_k}\delta(dx_k)\right\}\Bigg|_{\substack{\delta x_1 = dx_1, \\ \ldots\ldots \\ \delta x_m = dx_m}} = \sum_{k=1}^{m}\left\{dx_k \sum_{i=1}^{m} \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\partial u}{\partial x_k}\right)\delta x_i\right\}\Bigg|_{\substack{\delta x_1 = dx_1, \\ \ldots\ldots \\ \delta x_m = dx_m}} = \\ &= \left[\sum_{k=1}^{m}\sum_{i=1}^{m} \frac{\partial^2 u}{\partial x_i \partial x_k}\delta x_i \cdot dx_k\right]\Bigg|_{\substack{\delta x_1 = dx_1, \\ \ldots\ldots \\ \delta x_m = dx_m}} = \sum_{k=1}^{m}\sum_{i=1}^{m} \frac{\partial^2 u}{\partial x_i \partial x_k}\, dx_i\, dx_k. \end{aligned} \tag{14.43}$$

(Мы воспользовались еще и тем, что для два раза дифференцируемой функции смешанные производные второго порядка не зависят от того, в какой последовательности производится дифференцирование.)

Итак, мы получаем, что в случае, когда аргументы $x_1, x_2, \ldots, x_m$ являются независимыми переменными, для второго дифференциала два раза дифференцируемой в данной точке функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ справедливо представление:

$$d^2u = \sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m} \frac{\partial^2 u}{\partial x_i \partial x_k}\, dx_i\, dx_k. \tag{14.44}$$

Замечание 1. Функция m переменных $t_1, t_2, \ldots, t_m$ вида $\Phi = \sum_{i=1}^{m} \sum_{k=1}^{m} a_{ik} t_i t_k$, где a_{ik} — постоянные вещественные числа, называется *квадратичной формой* от переменных $t_1, t_2, \ldots, t_m$, а числа a_{ik} — ее коэффициентами.

Квадратичная форма называется симметричной, если ее коэффициенты удовлетворяют условию $a_{ik} = a_{ki}$ (для всех $i = 1, 2, \ldots, m$; $k = 1, 2, \ldots, m$).

Полученное нами выражение (14.44) позволяет утверждать, что для случая, когда аргументы $x_1, x_2, \ldots, x_m$ являются независимыми переменными, второй дифференциал два раза дифференцируемой в данной точке M функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ представляет собой симметричную[1]), квадратичную форму от переменных $dx_1, dx_2, \ldots, dx_m$, коэффициенты которой равны соответствующим частным производным второго порядка функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, взятым в данной точке M.

Отметим, что полученное нами выражение для дифференциала второго порядка (14.44) можно переписать и в другом виде, используя формальный символ

$$d = dx_1 \frac{\partial}{\partial x_1} + dx_2 \frac{\partial}{\partial x_2} + \ldots + dx_m \frac{\partial}{\partial x_m}. \tag{14.45}$$

С помощью этого символа выражение (14.44) может быть переписано в виде

$$d^2 u = \left(dx_1 \frac{\partial}{\partial x_1} + dx_2 \frac{\partial}{\partial x_2} + \ldots + dx_m \frac{\partial}{\partial x_m} \right)^2 u. \tag{14.46}$$

По индукции легко убедиться в том, что в случае, когда аргументы $x_1, x_2, \ldots, x_m$ n раз дифференцируемой в данной точке $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ являются независимыми переменными, для n-го дифференциала этой функции справедливо представление

$$d^n u = \sum_{i_1=1}^{m} \sum_{i_2=1}^{m} \ldots \sum_{i_n=1}^{m} \frac{\partial^n u}{\partial x_{i_1} \partial x_{i_2} \ldots \partial x_{i_n}} dx_{i_1} dx_{i_2} \ldots dx_{i_n}.$$

Это представление с помощью формального символа (14.45) может быть переписано в виде

$$d^n u = \left(dx_1 \frac{\partial}{\partial x_1} + dx_2 \frac{\partial}{\partial x_2} + \ldots + dx_m \frac{\partial}{\partial x_m} \right)^n u. \tag{14.47}$$

---

[1]) Симметричность этой квадратичной формы вытекает из равенства $\frac{\partial^2 u}{\partial x_i \partial x_k}(M) = \frac{\partial^2 u}{\partial x_k \partial x_i}(M)$.

Совершенно другой вид имеют представления для второго и последующих дифференциалов в случае, когда аргументы $x_1, x_2, \ldots, x_m$ функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ являются соответствующее число раз дифференцируемыми функциями некоторых независимых переменных $t_1, t_2, \ldots, t_k$.

Обращаясь к этому случаю, установим выражение для второго дифференциала два раза дифференцируемой в данной точке $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, аргументы $x_1, x_2, \ldots, x_m$ которой являются два раза дифференцируемыми функциями некоторых независимых переменных $t_1, t_2, \ldots, t_k$.

Повторяя рассуждения из цепочки (14.43), мы на этот раз получим

$$d^2u = \delta(du)\Big|_{\substack{\delta x_1 = dx_1, \\ \dots\dots\dots \\ \delta x_m = dx_m}} = \sum_{k=1}^{m} \left\{ dx_k \delta\left(\frac{\partial u}{\partial x_k}\right) + \frac{\partial u}{\partial x_k}\delta(dx_k) \right\}\Big|_{\substack{\delta x_1 = dx_1, \\ \dots\dots\dots \\ \delta x_m = dx_m}} =$$

$$= \sum_{k=1}^{m} \left\{ dx_k \sum_{i=1}^{m} \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\partial u}{\partial x_k}\right)\delta x_i \right\}\Big|_{\substack{\delta x_1 = dx_1, \\ \dots\dots\dots \\ \delta x_m = dx_m}} + \sum_{k=1}^{m} \left\{ \frac{\partial u}{\partial x_k}\delta(dx_k) \right\}\Big|_{\substack{\delta x_1 = dx_1, \\ \dots\dots\dots \\ \delta x_m = dx_m}}.$$

Заметим, что в силу определения второго дифференциала функции $u = x_k$ (где k — любой из номеров $1, 2, \ldots, m$)

$$[\delta(dx_k)]\Big|_{\substack{\delta x_1 = dx_1, \\ \dots\dots\dots \\ \delta x_m = dx_m}} = d^2x_k.$$

Учитывая это соотношение, мы приходим к следующему представлению для второго дифференциала:

$$d^2u = \sum_{k=1}^{m}\sum_{i=1}^{m} \frac{\partial^2 u}{\partial x_i \partial x_k}\, dx_i\, dx_k + \sum_{k=1}^{m} \frac{\partial u}{\partial x_k} d^2x_k$$

или (с использованием символа (14.45))

$$d^2u = \left(dx_1\frac{\partial}{\partial x_1} + dx_2\frac{\partial}{\partial x_2} + \ldots + dx_m\frac{\partial}{\partial x_m}\right)^2 u + \\ + \left(\frac{\partial u}{\partial x_1}d^2x_1 + \frac{\partial u}{\partial x_2}d^2x_2 + \ldots + \frac{\partial u}{\partial x_m}d^2x_m\right). \quad (14.48)$$

Сравнивая полученное нами представление (14.48) с представлением (14.46), мы убедимся в том, что (в отличие от первого дифференциала) второй дифференциал уже не обладает свойством инвариантности формы.

Тем более не обладают свойством инвариантности формы все последующие дифференциалы.

Замечание 2. Укажем важный частный случай, когда второй и последующие дифференциалы функции m от переменных $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ все же обладают инвариантностью формы и определяются той самой формулой (14.47), что и для случая независимых переменных $x_1, x_2, \ldots, x_m$.

Будем говорить, что переменные $x_1, x_2, \ldots, x_m$ являются линейными функциями независимых переменных $t_1, t_2, \ldots, t_k$, если они определяются равенствами

$$x_i = a_{i0} + a_{i1}t_1 + a_{i2}t_2 + \ldots + a_{ik}t_k \quad (i = 1, 2, \ldots, m),$$

в которых через $a_{i0}, a_{i1}, \ldots, a_{ik}$ обозначены некоторые постоянные.

Заметим, что *если функция* $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ *является* n *раз дифференцируемой в данной точке* $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, *а ее аргументы* $x_1, x_2, \ldots, x_m$ *являются линейными функциями независимых переменных* $t_1, t_2, \ldots, t_k$, *то* n*-й дифференциал функции* $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ *определяется той же самой формулой* (14.47), *что и для случая независимых переменных* $x_1, x_2, \ldots, x_m$.

Чтобы убедиться в этом, заметим, что поскольку $t_1, t_2, \ldots, t_k$ являются независимыми переменными, то n-й дифференциал x_i как функций аргументов $t_1, t_2, \ldots, t_k$ определяется равенством типа (14.47), а точнее равенством

$$d^n x_i = \left(dt_1 \frac{\partial}{\partial t_1} + dt_2 \frac{\partial}{\partial t_2} + \ldots + dt_k \frac{\partial}{\partial t_k}\right)^n x_i.$$

Но любая частная производная выше первого порядка от линейной функции x_i равна нулю.

Стало быть, $d^2 x_i = 0$, $d^3 x_i = 0$, $\ldots$, $d^n x_i = 0$.

Равенство $d^2 x_i = 0$ (при всех $i = 1, 2, \ldots, m$) и представление (14.48) дают право заключить, что $d^2 u$ определяется равенством (14.46). Совершенно аналогично, используя соотношения $d^3 x_i = 0$, $\ldots$, $d^n x_i = 0$, мы по индукции докажем, что $d^3 u, d^4 u, \ldots, d^n u$ определяются равенством (14.47).

Замечание 3. При проведении вычислений иногда требуется расшифровать равенство (14.47) и, учитывая, что в этом равенстве имеются совпадающие члены, выписать все различные члены этого равенства со стоящими перед ними коэффициентами.

Для этой цели может быть использована формула полинома Ньютона, имеющая вид

$$(a_1 + a_2 + \ldots + a_m)^n = \sum_{\substack{\alpha_1 + \alpha_2 + \ldots + \alpha_m = n \\ 0 \leqslant \alpha_i \leqslant n}} \frac{(\alpha_1 + \alpha_2 + \ldots + \alpha_m)!}{\alpha_1! \alpha_2! \ldots \alpha_m!} a_1^{\alpha_1} a_2^{\alpha_2} \ldots a_m^{\alpha_m} \tag{14.49}$$

(суммирование в правой части этой формулы идет по всем целочисленным индексам $\alpha_1, \alpha_2., \ldots, \alpha_m$, каждый из которых удовлетворяет неравенствам $0 \leqslant \alpha_i \leqslant n$ при условии, что сумма всех этих индексов $\alpha_1 + \alpha_2 + \ldots + \alpha_m$ равна n).

Формулу (14.49) нетрудно установить по индукции. В самом деле, при $m = 2$ и при любом натуральном n эта формула заведомо справедлива, ибо она переходит в известную формулу бинома Ньютона.

Предположим, что эта формула справедлива для некоторого номера $m \geqslant 2$ и любого натурального n, и проверим, что в таком случае она справедлива и для номера $m+1$ и любого натурального n.

Представив $(a_1 + a_2 + \ldots + a_m + a_{m+1})^n$ в виде

$$(a_1 + a_2 + \ldots + a_{m+1})^n = [(a_1 + a_2 + \ldots + a_m) + a_{m+1}]^n,$$

подсчитаем с помощью бинома Ньютона коэффициент при $a_1^{\alpha_1} a_2^{\alpha_2} \ldots a_m^{\alpha_m} a_{m+1}^{\alpha_{m+1}}$. В силу равенства $\alpha_1 + \alpha_2 + \ldots + \alpha_{m+1} = n$, формулы бинома Ньютона и предположения о справедливости формулы (14.49) для номера m и любого натурального n, этот коэффициент равен [1])

$$C_n^{\alpha_{m+1}} \cdot \frac{(\alpha_1 + \alpha_2 + \ldots + \alpha_m)!}{(\alpha_1)!(\alpha_2)! \ldots (\alpha_m)!} =$$
$$= \frac{(\alpha_1 + \alpha_2 + \ldots + \alpha_m + \alpha_{m+1})!}{(\alpha_{m+1})!(\alpha_1 + \alpha_2 + \ldots + \alpha_m)!} \cdot \frac{(\alpha_1 + \alpha_2 + \ldots + \alpha_m)!}{(\alpha_1)!(\alpha_2)! \ldots (\alpha_m)!} =$$
$$= \frac{(\alpha_1 + \alpha_2 + \ldots + \alpha_m + \alpha_{m+1})!}{(\alpha_1)!(\alpha_1)! \ldots (\alpha_m)!(\alpha_{m+1})!}.$$

Полученное выражение для коэффициента при $a_1^{\alpha_1} \cdot a_2^{\alpha_2} \ldots a_m^{\alpha_m} \cdot a_{m+1}^{\alpha_{m+1}}$ в точности совпадает с тем выражением, которое получится из формулы (14.49), если в этой формуле заменить номер m на $m+1$.

Индукция завершена, и формула (14.49) доказана.

Формула (14.49) дает нам право переписать выражение (14.47) для n-го дифференциала в следующем виде:

$$d^n u(M) = \sum_{\substack{\alpha_1+\alpha_2+\ldots+\alpha_m=n \\ 0\leqslant\alpha_i\leqslant n}} \frac{\partial^n u}{\partial x_1^{\alpha_1} \partial x_2^{\alpha_2} \ldots \partial x_m^{\alpha_m}} (M) \cdot (dx_1)^{\alpha_1} \cdot (dx_2)^{\alpha_2} \cdot (dx_m)^{\alpha_m}.$$

3. Формула Тейлора для функции mпеременных с остаточным членом в форме Лагранжа. Мы будем обозначать дифференциал k-го порядка функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ в точке M символом $d^k u|_M$. Докажем следующую теорему.

---

[1]) Мы учитываем, что $C_n^k = \dfrac{n!}{k!(n-k)!}$, и потому

$$C_n^{\alpha_{m+1}} = C_{\alpha_1+\alpha_2+\ldots+\alpha_{m+1}}^{\alpha_{m+1}} = \frac{(\alpha_1 + \alpha_2 + \ldots + \alpha_m + \alpha_{m+1})!}{(\alpha_{m+1})!(\alpha_1 + \alpha_2 + \ldots + \alpha_m)!}.$$

Теорема 14.15. *Пусть функция* $u = f(M) = f(x_1, x_2, \ldots$ $\ldots, x_m)$ *задана в некоторой* ε*-окрестности*[1] *точки* $M_0(\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_m)$ *и* $n+1$ *раз дифференцируема в указанной* ε*-окрестности. Тогда полное приращение* $\Delta u = f(M) - f(M_0)$ *этой функции в точке* M_0 *для любой точки* M *из указанной* ε*-окрестности может быть представлено в следующей форме:*

$$\Delta u = du\Big|_{M_0} + \frac{1}{2!}\,d^2u\Big|_{M_0} + \ldots + \frac{1}{n!}\,d^nu\Big|_{M_0} + \frac{1}{(n+1)!}\,d^{n+1}u\Big|_{N}, \quad (14.50)$$

при этом N *— некоторая точка указанной* ε*-окрестности, зависящая, вообще говоря, от* $M(x_1, x_2, \ldots, x_m)$*, а дифференциалы* dx_i *переменных* x_i*, входящие в выражения* $d^ku|_{M_0}$ *и* $d^{n+1}u|_N$*, равны* $\Delta x_i = x_i - \overset{\circ}{x}_i$. Формула (14.50) называется формулой Тейлора для функции $u = f(M)$ с центром разложения в точке M_0.

Доказательство. Для сокращения записи проведем рассуждения для функции $u = f(x, y)$ двух переменных x и y. Предварительно запишем в специальной форме формулу Тейлора для $n+1$ раз дифференцируемой в некоторой окрестности точки t_0 функции $u = F(t)$ одной переменной t. Напомним, что формула Тейлора с центром разложения в t_0 для функции $u = F(t)$ одной переменной имеет следующий вид (остаточный член взят в форме Лагранжа):

$$F(t) = F(t_0) + F'(t_0)(t - t_0) + \frac{1}{2!}F^{(2)}(t_0)(t - t_0)^2 + \ldots$$
$$\ldots + \frac{1}{n!}F^{(n)}(t_0)(t - t_0)^n + \frac{1}{(n+1)!}F^{(n+1)}(t_0 + \theta(t - t_0))(t - t_0)^{n+1},$$
$$0 < \theta < 1. \quad (14.51)$$

Так как аргумент t является независимой переменной, то приращение $\Delta t = t - t_0$ представляет собой дифференциал dt независимой переменной t. Поэтому

$$F^{(k)}(t_0)(t - t_0)^k = F^{(k)}(t_0)dt^k = d^kF(t_0) = d^ku|_{t_0}$$

и

$$F^{(n+1)}(t_0 + \theta(t - t_0))(t - t_0)^{n+1} = d^{n+1}u|_{t_0 + \theta(t - t_0)}. \quad (14.52)$$

Если мы обозначим разность $F(t) - F(t_0)$ через Δu, то, согласно (14.52), формулу Тейлора (14.51) можно записать в следующей

[1]) Вместо ε-окрестности точки M_0 можно взять так называемую звездную окрестность этой точки, которая определяется как такая окрестность точки M_0, которая вместе с каждой своей точкой M целиком содержит отрезок M_0M.

специальной форме:

$$\Delta u = du\Big|_{t_0} + \frac{1}{2!}d^2u\Big|_{t_0} + \ldots + \frac{1}{n!}d^n u\Big|_{t_0} + \frac{1}{(n+1)!}d^{(n+1)}u\Big|_{t_0+\theta(t-t_0)}. \tag{14.53}$$

Рассмотрим теперь в ε-окрестности точки $M_0(x_0, y_0)$ произвольную точку $M(x_0+\Delta x, y_0+\Delta y)$ и соединим точки M_0 и M прямой линией. Очевидно, координаты x и y точек указанной прямой представляют собой следующие *линейные функции* новой переменной t:

$$x = x_0 + t\Delta x, \qquad y = y_0 + t\Delta y; \tag{14.54}$$

при этом координаты точек отрезка M_0M соответствуют значениям переменной t из сегмента $[0, 1]$. Отметим, что значению $t = 0$ отвечает точка M_0, а значению $t = 1$ — точка M. Так как по условию функция $u = f(x, y)$ двух переменных x и y в рассматриваемой окрестности точки M_0 $n+1$ раз дифференцируема, то из формул (14.54) вытекает, что на прямой M_0M эта функция является сложной функцией переменной t, $(n+1)$ раз дифференцируемой по крайней мере для всех значений t из сегмента $[0, 1]$. Обозначим эту сложную функцию через $F(t)$ и запишем для нее формулу Тейлора с центром разложения в точке $t_0 = 0$ в специальной форме (14.53) при

$$\Delta u = F(1) - F(0) = f(M) - f(M_0).$$

Фигурирующие в формуле (14.53) дифференциалы различных порядков представляют собой дифференциалы сложной функции $u = f(x, y)$, где x и y являются линейными функциями (14.54). Согласно замечанию предыдущего пункта при этих условиях дифференциалы любого порядка функции $u = f(x, y)$ могут быть записаны в форме (14.47). Поэтому

$$\begin{gathered} d^k u\Big|_{t_0=0} = \left(\frac{\partial}{\partial x}\,dx + \frac{\partial}{\partial y}\,dx\right)^k u\Big|_{M_0(x_0,y_0)} = d^k u\Big|_{M_0}, \\ d^{n+1}u\Big|_{t_0+\theta(t-t_0)} = \left(\frac{\partial}{\partial x}\,dx + \frac{\partial}{\partial y}\,dx\right)^{n+1} \times \\ \times u\Big|_{N(x_0+\theta\Delta x,\, y_0+\theta\Delta y)} = d^{n+1}u|_N, \end{gathered} \tag{14.55}$$

причем в формулах (14.55) dx и dy находятся из соотношений (14.54) при $dt = \Delta t = 1 - 0 = 1$. Таким образом, в формулах (14.55)

$$dx = dt\,\Delta x = \Delta x \quad \text{и} \quad dy = dt\,\Delta y = \Delta y. \tag{14.56}$$

Подставляя $d^k u|_{t_0}$ и $d^{n+1}u|_{t_0+\theta(t-t_0)}$ из (14.55) в формулу (14.53) и учитывая соотношения (14.56), мы получим формулу Тейлора (14.50). Теорема доказана.

Приведем развернутое выражение формулы Тейлора (14.50) для функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$:

$$f(x_1, x_2, \ldots, x_m) = f(\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_m) + \\ + \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{k!} \left[\frac{\partial}{\partial x_1}(x_1 - \overset{\circ}{x}_1) + \frac{\partial}{\partial x_2}(x_2 - \overset{\circ}{x}_2) + \ldots \right. \\ \left. \ldots + \frac{\partial}{\partial x_m}(x_m - \overset{\circ}{x}_m) \right]^k f(\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_m) + \\ + \frac{1}{(n+1)!} \left[\frac{\partial}{\partial x_1}(x_1 - \overset{\circ}{x}_1) + \frac{\partial}{\partial x_2}(x_2 - \overset{\circ}{x}_2) + \ldots + \frac{\partial}{\partial x_m}(x_m - \overset{\circ}{x}_m) \right]^{n+1} \times \\ \times f[\overset{\circ}{x}_1 + \theta(x_1 - \overset{\circ}{x}_1), \overset{\circ}{x}_2 + \theta(x_2 - \overset{\circ}{x}_2), \ldots, \overset{\circ}{x}_m + \theta(x_m - \overset{\circ}{x}_m)]. \quad (14.57)$$

4. Формула Тейлора с остаточным членом в форме Пеано.

Теорема 14.15*. *Пусть $n \geqslant 1$ — целое число, функция $u = f(M) = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ задана и $(n-1)$ раз дифференцируема в ε-окрестности точки $M_0(\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_m)$ и n раз дифференцируема в самой точке M_0* [1]*. Тогда для любой точки M из указанной ε-окрестности M_0 справедлива следующая формула:*

$$f(M) = f(M_0) + \frac{1}{1!}\, du\Big|_{M_0} + \frac{1}{2!}\, d^2u\Big|_{M_0} + \ldots + \frac{1}{n!}\, d^n u\Big|_{M_0} + o(\rho^n), \quad (14.58)$$

в которой через ρ обозначено расстояние $\rho(M_0, M)$, а символ $o(\rho^n)$ обозначает бесконечно малую при $\rho \to 0$ (или при $M \to M_0$) функцию более высокого порядка малости, чем ρ^n.

Формула (14.58) называется формулой Тейлора (с центром в точке M_0) с остаточным членом в форме Пеано.

Замечание. В более подробной записи формула Тейлора (14.58) имеет вид:

$$f(x_1, x_2, \ldots, x_m) = f(\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_m) + \\ + \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{k!} \left[(x_1 - \overset{\circ}{x}_1)\frac{\partial}{\partial x_1} + \ldots + (x_m - \overset{\circ}{x}_m)\frac{\partial}{\partial x_m} \right]^k \times \\ \times f(\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_m) + o(\rho^n). \quad (14.59)$$

Заметим, что в правой части (14.59) стоит сумма многочлена степени n от m переменных $x_1, x_2, \ldots, x_m$ и остаточного члена $o(\rho^n)$.

---

[1] При $n = 1$ следует требовать, чтобы функция $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ была только задана в ε-окрестности точки M_0 и дифференцируема в самой точке M_0.

Обозначим $R_{n+1}(M)$ разность между $f(M)$ и указанным многочленом, т. е. положим

$$R_{n+1}(M) = f(M) - f(M_0) - \\ - \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{k!}\left[(x_1 - \overset{\circ}{x}_1)\frac{\partial}{\partial x_1} + \ldots + (x_m - \overset{\circ}{x}_m)\frac{\partial}{\partial x_m}\right]^k f(M_0). \quad (14.60)$$

Теорема 14.15* будет доказана, если мы установим, что при выполнении условий этой теоремы $R_{n+1}(M) = o(\rho^n)$.

Доказательству теоремы 14.15* предпошлем две леммы.

Лемма 1. *Если функция $f(M) = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ n раз дифференцируема в точке $M_0(\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_m)$, то как сама функция $R_{n+1}(M)$, определяемая равенством* (14.60), *так и все ее частные производные по любым переменным $x_1, x_2, \ldots, x_m$ до порядка n включительно обращаются в нуль в точке M_0.*

Доказательство. При $n = 1$ функция (14.60) принимает вид

$$R_2(M) = f(M) - f(M_0) - (x_1 - \overset{\circ}{x}_1)\frac{\partial f}{\partial x_1}(M_0) - \ldots \\ \ldots - (x_m - \overset{\circ}{x}_m)\frac{\partial f}{\partial x_m}(M_0),$$

и равенства $R_2(M_0) = 0$, $\dfrac{\partial R_2}{\partial x_i}(M_0) = 0$ (при всех $i = 1, 2, \ldots, m$) проверяются элементарно.

Для проведения индукции предположим, что лемма справедлива для некоторого номера $n \geqslant 1$, и докажем, что в таком случае она справедлива и для номера $n + 1$.

Пусть функция $f(M)$ $(n + 1)$ раз дифференцируема в точке M_0 и

$$R_{n+2}(M) = f(M) - f(M_0) - \\ - \sum_{k=1}^{n+1} \frac{1}{k!}\left[(x_1 - \overset{\circ}{x}_1)\frac{\partial}{\partial x_1} + \ldots + (x_m - \overset{\circ}{x}_m)\frac{\partial}{\partial x_m}\right]^k f(M_0). \quad (14.61)$$

Равенство $R_{n+2}(M_0) = 0$ проверяется элементарно (достаточно учесть, что каждая круглая скобка $(x_i - \overset{\circ}{x}_i)$ в (14.61) обращается в нуль в точке M_0).

Нам остается доказать, что для любого $i = 1, 2, \ldots, m$ сама функция $\dfrac{\partial R_{n+2}}{\partial x_i}(M)$ и все частные производные этой функции до порядка n включительно обращаются в нуль в точке M_0, а для этого в силу сделанного нами предположения о справедливости леммы для номера n достаточно доказать, что функция

$\dfrac{\partial R_{n+2}}{\partial x_i}(M)$ определяется равенством типа (14.60), а точнее равенством

$$\frac{\partial R_{n+2}}{\partial x_i}(M) = \frac{\partial f}{\partial x_i}(M) - \frac{\partial f}{\partial x_i}(M_0) - \\ - \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{k!}\left[(x_1 - \overset{\circ}{x}_1)\frac{\partial}{\partial x_1} + \ldots + (x_m - \overset{\circ}{x}_m)\frac{\partial}{\partial x_m}\right]^k \frac{\partial f}{\partial x_i}(M_0). \quad (14.62)$$

Так как все переменные x_i $(i = 1, 2, \ldots, m)$ равноправны и входят в выражение для $R_{n+2}(M)$ симметрично, то достаточно доказать равенство (14.62) для $i = 1$, т. е. доказать равенство

$$\frac{\partial R_{n+2}}{\partial x_1}(M) = \frac{\partial f}{\partial x_1}(M) - \frac{\partial f}{\partial x_1}(M_0) - \\ - \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{k!}\left[(x_1 - \overset{\circ}{x}_1)\frac{\partial}{\partial x_1} + \ldots + (x_m - \overset{\circ}{x}_m)\frac{\partial}{\partial x_m}\right]^k \frac{\partial f}{\partial x_1}(M_0). \quad (14.63)$$

Из (14.61) очевидно, что для доказательства (14.63) достаточно убедиться, что для каждого номера $k = 1, 2, \ldots, n+1$ при фиксированных $x_2, x_3, \ldots, x_m$

$$\frac{d}{dx_1}\left[(x_1 - \overset{\circ}{x}_1)\frac{\partial}{\partial x_1} + (x_2 - \overset{\circ}{x}_2)\frac{\partial}{\partial x_2} + \ldots + (x_m - \overset{\circ}{x}_m)\frac{\partial}{\partial x_m}\right]^k f(M_0) = \\ = k\left[(x_1 - \overset{\circ}{x}_1)\frac{\partial}{\partial x_1} + (x_2 - \overset{\circ}{x}_2)\frac{\partial}{\partial x_2} + \ldots + (x_m - \overset{\circ}{x}_m)\frac{\partial}{\partial x_m}\right]^{k-1} \frac{\partial f}{\partial x_1}(M_0). \quad (14.64)$$

Так как при дифференцировании по x_1 переменные $x_2, x_3, \ldots, x_m$ фиксированы, то величину

$$D = (x_2 - \overset{\circ}{x}_2)\frac{\partial}{\partial x_2} + \ldots + (x_m - \overset{\circ}{x}_m)\frac{\partial}{\partial x_m}$$

при дифференцировании по x_1 можно рассматривать как постоянную. К этому следует добавить, что поскольку символы $\dfrac{\partial}{\partial x_1}$, $\dfrac{\partial}{\partial x_2}$, …, $\dfrac{\partial}{\partial x_m}$ используются для образования частных производных функции f в ф и к с и р о в а н н о й точке M_0, то при дифференцировании по x_1 указанные символы также нужно рассматривать как постоянные величины.

В силу сказанного для доказательства равенства (14.64) достаточно убедиться в справедливости равенства

$$\frac{d}{dx_1}\left[(x_1 - \overset{\circ}{x}_1)\frac{\partial}{\partial x_1} + D\right]^k = k\left[(x_1 - \overset{\circ}{x}_1)\frac{\partial}{\partial x_1} + D\right]^{k-1} \frac{\partial}{\partial x_1}. \quad (14.65)$$

Дифференцируя функцию $\left[(x_1 - \overset{\circ}{x}_1)\frac{\partial}{\partial x_1} + D\right]^k$ по x_1 как сложную и учитывая отмеченную выше независимость от x_1 символов D и $\frac{\partial}{\partial x_1}$, мы получим равенство (14.65). Индукция завершена.

Лемма 1 доказана.

Лемма 2. *Пусть $R(M) = R(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ — произвольная функция, удовлетворяющая двум требованиям:*

1) $R(M)$ n раз дифференцируема в точке $M_0(\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_m)$;

2) сама функция $R(M)$ и все ее частные производные по любым из переменных $x_1, x_2, \ldots, x_m$ до порядка n включительно обращаются в нуль в указанной точке M_0. Тогда для функции $R(M)$ справедлива оценка

$$R(M) = o(\rho^n), \tag{14.66}$$

где буквой ρ обозначено расстояние $\rho(M_0, M)$ между точками M_0 и M.

Доказательство. При $n = 1$ утверждение леммы вытекает из условия дифференцируемости[1] функции $R(M)$ в точке M_0, которое имеет вид:

$$R(M) - R(M_0) = \sum_{k=1}^{m} \frac{\partial R}{\partial x_k}(M_0)(x_k - \overset{\circ}{x}_k) + o(\rho).$$

Учитывая, что $R(M_0) = 0$, $\frac{\partial R}{\partial x_k}(M_0) = 0$ для всех $k = 1, 2, \ldots, m$, мы и получим, что $R(M) = o(\rho)$.

Для проведения индукции предположим, что лемма 2 справедлива для некоторого номера $n \geqslant 1$, и докажем, что в таком случае она справедлива и для номера $n+1$.

Пусть функция $R(M)$ удовлетворяет двум требованиям леммы 2 для номера $n+1$. Тогда, очевидно, любая частная производная этой функции первого порядка $\frac{\partial R}{\partial x_k}(M)$ $(k = 1, 2, \ldots, m)$ будет удовлетворять двум требованиям леммы 2 для номера n, а потому (в силу сделанного нами предположения о справедливости леммы 2 для номера n) будет справедлива оценка

$$\frac{\partial R}{\partial x_k}(M) = o(\rho^n). \tag{14.66*}$$

Заметим теперь, что поскольку $n \geqslant 1$, то $n+1 \geqslant 2$ и функция $R(M)$, удовлетворяющая двум требованиям леммы 2 для номера $n+1$, во всяком случае один раз дифференцируема в окрестно-

[1] См. соотношение (14.16) из п. 2 § 4 этой главы.

сти точки M_0. Поэтому для этой функции выполнены условия теоремы 14.15 для номера $n = 0$. Согласно указанной теореме для любой точки M из достаточно малой ε-окрестности точки M_0 на отрезке M_0M найдется точка N такая, что справедлива формула

$$R(M) = R(M_0) + \frac{1}{1!}\sum_{k=1}^{m}(x_k - \overset{\circ}{x}_k)\frac{\partial R}{\partial x_k}(N). \tag{14.67}$$

Заметим теперь, что поскольку точка N лежит между точками M_0 и M, а ρ — расстояние между точками M_0 и M, то $\rho(N, M_0) \leqslant \rho$, и потому из (14.66*) вытекает, что

$$\frac{\partial R}{\partial x_k}(N) = o(\rho^n).$$

Подставляя последнюю оценку в (14.67) и учитывая, что $R(M_0) = 0$, получим, что

$$R(M) = o(\rho^n)\sum_{k=1}^{m}|x_k - \overset{\circ}{x}_k|.$$

Так как $|x_k - \overset{\circ}{x}_k| \leqslant \sqrt{\sum\limits_{i=1}^{m}(x_i - \overset{\circ}{x}_i)^2} = \rho$, то окончательно получим, что $R(M) = o(\rho^n)$.

Индукция завершена. Лемма 2 доказана.

Доказательство теоремы 14.15* легко проводится с помощью лемм 1 и 2.

В самом деле, выше уже отмечалось, что для доказательства теоремы 14.15* достаточно установить, что при выполнении условий этой теоремы для функции (14.60) справедлива оценка

$$R_{n+1}(M) = o(\rho^n).$$

В силу леммы 1 сама функция (14.60) и все ее частные производные по любым переменным $x_1, x_2, \ldots, x_m$ до порядка n включительно обращаются в нуль в точке M_0. Но тогда в силу леммы 2 для функции (14.60) справедлива оценка $R_{n+1}(M) = o(\rho^n)$.

Теорема 14.15* доказана.

§ 6. Локальный экстремум функции m переменных

1. Понятие экстремума функции m переменных. Необходимые условия локального экстремума. Пусть функция m переменных $u = f(M) = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ определена в некоторой окрестности точки $M_0(\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_m)$ пространства E^m.

Определение 1. Будем говорить, что *функция* $u = f(M)$ *имеет в точке* M_0 *локальный максимум* (*локальный минимум*), *если найдется такая* δ*-окрестность точки* M_0, *в пределах которой значение* $f(M_0)$ *является наибольшим* (*наименьшим*) *среди всех значений* $f(M)$ *этой функции.*

Определение 2. *Будем говорить, что функция* $u = f(M)$ *имеет в точке* M_0 *локальный экстремум, если она имеет в этой точке либо локальный максимум, либо локальный минимум.*

Установим необходимые условия локального экстремума функции $u = f(M)$, обладающей в данной точке M_0 частными производными первого порядка по всем переменным.

Докажем следующее утверждение: *если функция* $u = f(M) = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ *обладает в точке* $M_0(\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots$ $\ldots, \overset{\circ}{x}_m)$ *частными производными первого порядка по всем переменным* $x_1, x_2, \ldots, x_m$ *и имеет в этой точке локальный экстремум, то все частные производные первого порядка обращаются в точке* M_0 *в нуль, т. е. справедливы равенства*:

$$\frac{\partial u}{\partial x_1}(M_0) = 0, \ \frac{\partial u}{\partial x_2}(M_0) = 0, \ \ldots, \ \frac{\partial u}{\partial x_m}(M_0) = 0. \qquad (14.68)$$

Доказательство. Установим справедливость первого равенства (14.68). Фиксируем у функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ аргументы $x_2, x_3, \ldots, x_m$, положив их равными соответствующим координатам точки M_0, т. е. положив $x_2 = \overset{\circ}{x}_2$, $x_3 = \overset{\circ}{x}_3$, $\ldots$ $\ldots, x_m = \overset{\circ}{x}_m$. При этом мы получим функцию $u = f(\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots$ $\ldots, \overset{\circ}{x}_m)$ одной переменной x_1. Производная этой функции одной переменной в точке $x_1 = \overset{\circ}{x}_1$ совпадает с частной производной $\dfrac{\partial u}{\partial x_1}(M_0)$.

Так как функция m переменных $u = f(M)$ имеет локальный экстремум в точке M_0, то указанная функция одной переменной $u = f(x_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_m)$ имеет локальной экстремум в точке $x_1 = \overset{\circ}{x}_1$, и поэтому (в силу результатов п. 2 § 7 гл. 8) производная этой функции одной переменной в точке $x_1 = \overset{\circ}{x}_1$, совпадающая с частной производной $\dfrac{\partial u}{\partial x_1}(M_0)$, равна нулю.

Первое равенство (14.68) доказано. Остальные равенства (14.68) доказываются аналогично.

Подчеркнем, что равенства (14.68) (т. е. обращение в нуль в данной точке M_0 всех частных производных первого порядка) являются лишь необходимыми и не являются достаточными условиями локального экстремума функции $u = f(M)$ в точке M_0.

Например, у функции двух переменных $u = xy$ обе частные производные $\dfrac{\partial u}{\partial x}$ и $\dfrac{\partial u}{\partial y}$ обращаются в нуль в точке $M_0(0,0)$, но никакого экстремума в этой точке $M_0(0,0)$ указанная функция не имеет, ибо эта функция $u = xy$ равна нулю в самой точке $M_0(0,0)$, а в как угодно малой δ-окрестности этой точки принимает как положительные, так и отрицательные значения.

Точки, в которых обращаются в нуль все частные производные первого порядка функции $u = f(M)$, называются **точками возможного экстремума** этой функции.

В каждой точке возможного экстремума у функции $u = f(M)$ может быть локальный экстремум, однако наличие этого экстремума можно установить лишь с помощью достаточных условий локального экстремума, выяснению которых будет посвящен следующий пункт.

Из доказанного выше утверждения вытекает и другая форма необходимых условий локального экстремума:

если функция $u = f(M)$ дифференцируема в точке M_0 и имеет в этой точке локальный экстремум, то дифференциал $du|_{M_0}$ этой функции в точке M_0 равен нулю тождественно относительно дифференциалов независимых переменных $dx_1, dx_2, \ldots, dx_m$.

В самом деле, поскольку

$$du|_{M_0} = \frac{\partial u}{\partial x_1}(M_0)\,dx_1 + \frac{\partial u}{\partial x_2}(M_0)\,dx_2 + \ldots + \frac{\partial u}{\partial x_m}(M_0)\,dx_m,$$

то из равенств (14.68) вытекает, что *при любых* $dx_1, dx_2, \ldots, dx_m$ справедливо равенство $du|_{M_0} = 0$.

2. Достаточные условия локального экстремума. При формулировке достаточных условий локального экстремума функции m переменных $u = f(M)$ важную роль будет играть второй дифференциал этой функции в обследуемой точке M_0.

В п. 2 § 5 этой главы мы убедились в том, что для случая, когда аргументы $x_1, x_2, \ldots, x_m$ два раза дифференцируемой функции $u = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ являются либо независимыми переменными, либо линейными функциями некоторых независимых переменных, второй дифференциал этой функции в данной точке M_0 представляет собой квадратичную форму относительно дифференциалов аргументов $dx_1, dx_2, \ldots, dx_m$ следующего вида:

$$d^2u|_{M_0} = \sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m} a_{ik}\,dx_i\,dx_k, \qquad (14.69)$$

где

$$a_{ik} = a_{ki} = \frac{\partial^2 u}{\partial x_i\,\partial x_k}(M_0). \qquad (14.70)$$

Для формулировки достаточных условий локального экстремума нам понадобятся некоторые сведения из теории квадратичных форм, которые мы для удобства читателя приводим ниже [1]).

Квадратичная форма относительно переменных $h_1, h_2, \ldots, h_m$

$$\Phi(h_1, h_2, \ldots, h_m) = \sum_{i=1}^{m} \sum_{k=1}^{m} a_{ik} h_i h_k \tag{14.71}$$

называется положительно определенной (отрицательно определенной), если для любых значений $h_1, h_2, \ldots, h_m$, одновременно не равных нулю, эта форма принимает строго положительные (строго отрицательные) значения.

Квадратичная форма (14.71) называется знакоопределенной, если она является либо положительно определенной, либо отрицательно определенной.

Квадратичная форма (14.71) называется знакопеременной, если она принимает как строго положительные, так и строго отрицательные значения.

Квадратичная форма (14.71) называется квазизнакоопределенной, если она принимает либо только неотрицательные, либо только неположительные значения, но при этом обращается в нуль для значений $h_1, h_2, \ldots, h_m$, одновременно не равных нулю.

Сформулируем так называемый *критерий Сильвестра* знакоопределенности квадратичной формы [2]).

Назовем *матрицей квадратичной формы* (14.71) следующую матрицу:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \ldots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \ldots & a_{2m} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ a_{m1} & a_{m2} & \ldots & a_{mm} \end{pmatrix}. \tag{14.72}$$

Если все элементы матрицы A удовлетворяют условию $a_{ik} = a_{ki}$ ($i = 1, 2, \ldots, m$; $k = 1, 2, \ldots, m$), то указанная матрица называется симметричной.

[1]) Все приводимые здесь определения и утверждения можно найти, например, в книге: Ильин В.А., Позняк Э.Г. Линейная алгебра. — М.: Наука, 1978.

[2]) Дж. Сильвестр — английский математик (1814-1897).

Назовем *главными минорами* симметричной матрицы (14.72) следующие определители:

$$A_1 = a_{11}, \quad A_2 = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}, \quad A_3 = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}, \quad \ldots$$

$$\ldots, \quad A_m = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \ldots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \ldots & a_{2m} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ a_{m1} & a_{m2} & \ldots & a_{mm} \end{vmatrix}.$$

Критерии Сильвестра формулируется в виде следующих двух утверждений:

1°. *Для того чтобы квадратичная форма* (14.71) *с симметричной матрицей* (14.72) *являлась положительно определенной, необходимо и достаточно, чтобы все главные миноры матрицы* (14.72) *были положительны, т. е. чтобы были справедливы неравенства*

$$A_1 > 0, \quad A_2 > 0, \quad \ldots, \quad A_m > 0.$$

2°. *Для того чтобы квадратичная форма* (14.71) *с симметричной матрицей* (14.72) *являлась отрицательно определенной, необходимо и достаточно, чтобы знаки главных миноров матрицы* (14.72) *чередовались, причем знак* A_1 *был отрицателен, т. е. чтобы были справедливы неравенства*

$$A_1 < 0, \quad A_2 > 0, \quad A_3 < 0, \quad A_4 > 0, \ldots$$

Теперь мы подготовлены к тому, чтобы сформулировать и доказать теорему, устанавливающую достаточные условия локального экстремума.

Теорема 14.16. *Пусть функция* m *переменных* $u = f(M) = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ *один раз дифференцируема в некоторой окрестности точки* $M_0(\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_m)$ *и два раза дифференцируема в самой точке* M_0. *Пусть, кроме того, точка* M_0 *является точкой возможного экстремума функции* $u = f(M)$, *т. е.* $du|_{M_0} = 0$. *Тогда, если второй дифференциал* (14.69), (14.70) *представляет собой положительно определенную* (*отрицательно определенную*) *квадратичную форму от переменных* dx_1, dx_2, $\ldots$, dx_m, *то функция* $u = f(M)$ *имеет в точке* M_0 *локальный минимум* (*локальный максимум*). *Если же второй дифференциал* (14.69), (14.70) *представляет собой знакопеременную квадратичную форму, то функция* $u = f(M)$ *не имеет локального экстремума в точке* M_0.

Доказательство. Докажем сначала первую часть теоремы, предполагая, ради определенности, что второй дифференциал (14.69), (14.70) представляет собой положительно определенную квадратичную форму от переменных $dx_1, dx_2, \ldots, dx_m$. Докажем, что в этом случае функция $u = f(M)$ имеет в точке M_0 локальный минимум.

Разложим функцию $u = f(M)$ в окрестности точки M_0 по формуле Тейлора с остаточным членом в форме Пеано, беря в этой формуле $n = 2$ [1]).

Мы получим при этом, что

$$f(M) - f(M_0) = du\Big|_{M_0} + \frac{1}{2!}\, d^2u\Big|_{M_0} + o(\rho^2), \qquad (14.73)$$

причем в равенстве (14.73) дифференциалы dx_k переменных x_k, входящие в выражения для $du|_{M_0}$ и $d^2u|_{M_0}$, равны соответствующим приращениям $(x_k - \overset{\circ}{x}_k)$ этих переменных, а величина ρ равна

$$\rho = \sqrt{(dx_1)^2 + (dx_2)^2 + \ldots + (dx_m)^2} =$$
$$= \sqrt{(x_1 - \overset{\circ}{x}_1)^2 + (x_2 - \overset{\circ}{x}_2)^2 + \ldots + (x_m - \overset{\circ}{x}_m)^2}. \qquad (14.74)$$

По условию теоремы точка M_0 является точкой возможного экстремума. Поэтому на основании результатов предыдущего пункта $du|_{M_0} = 0$. Учитывая это равенство и полагая в выражениях (14.69), (14.70) для второго дифференциала $dx_k = x_k - \overset{\circ}{x}_k$, мы придадим формуле Тейлора (14.73) следующий вид:

$$f(M) - f(M_0) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m} \sum_{k=1}^{m} a_{ik}(x_i - \overset{\circ}{x}_i)(x_k - \overset{\circ}{x}_k) + o(\rho^2). \qquad (14.75)$$

Достаточно доказать, что для всех достаточно малых ρ правая часть (14.75) положительна. (Это и будет означать, что в достаточно малой окрестности точки M_0 разность $f(M) - f(M_0)$ положительна, т. е. функция $u = f(M)$ имеет в точке M_0 локальный минимум.)

Положим $h_i = \dfrac{x_i - \overset{\circ}{x}_i}{\rho}$, где $i = 1, 2, \ldots, m$. Тогда из выражения (14.74) для ρ вытекают следующие соотношения:

$$|h_i| \leqslant 1, \quad h_1^2 + h_2^2 + \ldots + h_m^2 = 1. \qquad (14.76)$$

[1]) Для функции $u = f(M)$ выполнены при $n = 2$ все условия теоремы 14.15* (см. п. 4 § 5 этой главы).

С помощью введенных обозначений равенство (14.75) может быть переписано в виде

$$f(M) - f(M_0) = \frac{\rho^2}{2} \sum_{i=1}^{m} \sum_{k=1}^{n} a_{ik} h_i h_k + o(\rho^2). \qquad (14.75^*)$$

Отношение $\frac{o(\rho^2)}{\rho^2}$ представляет собой бесконечно малую при $\rho \to 0$ (или при $M \to M_0$) функцию, которую мы обозначим $\alpha(\rho)$. Введение этой функции позволяет нам записать равенство $o(\rho^2) = \rho^2 \cdot \alpha(\rho)$, с помощью которого мы придадим соотношению (14.75*) вид:

$$f(M) - f(M_0) = \rho^2 \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m} \sum_{k=1}^{m} a_{ik} h_i h_k + \alpha(\rho) \right]. \qquad (14.75^{**})$$

Теперь уже нетрудно доказать, что правая часть (14.75**) является положительной для всех достаточно малых ρ. Квадратичная форма $\Phi = \sum\limits_{i=1}^{m} \sum\limits_{k=1}^{m} a_{ik} h_i h_k$ представляет собой функцию, определенную и непрерывную на поверхности единичной сферы (14.76), представляющей собой замкнутое и ограниченное множество. По второй теореме Вейерштрасса (см. теорему 14.7 из п. 2 § 3 гл. 14) эта функция достигает на указанном множестве своей точной нижней грани μ, причем из положительной определенности квадратичной формы (14.71) и из того, что $h_1, h_2, \ldots, h_m$, удовлетворяющие соотношению (14.76), не равны одновременно нулю, вытекает, что указанная точная нижняя грань μ строго положительна.

Так как бесконечно малая при $\rho \to 0$ функция $\alpha(\rho)$ при всех достаточно малых ρ удовлетворяет неравенству $|\alpha(\rho)| < \mu$, то вся правая часть (14.75) является положительной при всех достаточно малых ρ, т. е. при всех M, достаточно близких к M_0.

Это и означает, что функция $u = f(M)$ имеет в точке M_0 локальный минимум.

Совершенно аналогично доказывается, что в случае, когда второй дифференциал (14.69), (14.70) представляет собой отрицательно определенную квадратичную форму, функция $u = f(M)$ имеет в точке M_0 локальный максимум.

Докажем теперь вторую часть теоремы, т. е. докажем, что в случае, когда второй дифференциал (14.69), (14.70) представляет собой знакопеременную квадратичную форму, функция $u = f(M)$ не имеет локального экстремума в точке M_0.

Прежде всего установим следующее вспомогательное свойство знакопеременной квадратичной формы (14.71).

Если квадратичная форма $\Phi(h_1, h_2, \ldots, h_m)$ *знакопеременна, то найдутся две совокупности переменных* $(h'_1, h'_2, \ldots, h'_m)$ *и* $(h''_1, h''_2, \ldots, h''_m)$ *такие, что*

$$(h'_1)^2 + (h'_2)^2 + \ldots + (h'_m)^2 = 1, \; (h''_1)^2 + (h''_2)^2 + \ldots + (h''_m)^2 = 1, \tag{14.77}$$

причем

$$\Phi(h'_1, h'_2, \ldots, h'_m) > 0, \quad \Phi(h''_1, h''_2, \ldots, h''_m) < 0. \tag{14.78}$$

В самом деле, в силу определения знакопеременной квадратичной формы найдутся две совокупности аргументов $(t'_1, t'_2, \ldots, t'_m)$ и $(t''_1, t''_2, \ldots, t''_m)$, состоящие из чисел, одновременно не равных нулю, и такие, что

$$\Phi(t'_1, t'_2, \ldots, t'_m) > 0, \quad \Phi(t''_1, t''_2, \ldots, t''_m) < 0. \tag{14.79}$$

Положив

$$h'_i = \frac{t'_i}{\sqrt{(t'_1)^2 + (t'_2)^2 + \ldots + (t'_m)^2}}, \; h''_i = \frac{t''_i}{\sqrt{(t''_1)^2 + (t''_2)^2 + \ldots + (t''_m)^2}} \tag{14.80}$$

и учитывая, что из определения (14.71) квадратичной формы сразу же вытекает, что

$$\Phi(h'_1, h'_2, \ldots, h'_m) = \frac{1}{(t'_1)^2 + (t'_2)^2 + \ldots + (t'_m)^2} \cdot \Phi(t'_1, t'_2, \ldots, t'_m),$$

$$\Phi(h''_1, h''_2, \ldots, h''_m) = \frac{1}{(t''_1)^2 + (t''_2)^2 + \ldots + (t''_m)^2} \cdot \Phi(t''_1, t''_2, \ldots, t''_m),$$

мы получим (в силу (14.79)) неравенства (14.78), причем из соотношений (14.80) сразу же вытекают равенства (14.77).

Вспомогательное свойство знакопеременной квадратичной формы доказано.

Возвратимся теперь к доказательству второй части теоремы.

Зафиксируем две совокупности переменных $(h'_1, h'_2, \ldots, h'_m)$ и $(h''_1,\ h''_2,\ \ldots,\ h''_m)$, удовлетворяющие соотношениям (14.77) и (14.78), и докажем, что для любого $\rho > 0$ найдутся две точки $M'(x'_1, x'_2, \ldots, x'_m)$ и $M''(x''_1, x''_2, \ldots, x''_m)$ пространства E^m такие, что $\rho(M', M_0) = \rho(M'', M_0) = \rho$, причем

$$\frac{x'_i - \overset{\circ}{x}_i}{\rho} = h'_i, \; \frac{x''_i - \overset{\circ}{x}_i}{\rho} = h''_i \text{ для всех } i = 1, 2, \ldots, m. \tag{14.81}$$

В самом деле, положив для любого $\rho > 0$ и для каждого номера i $(i = 1, 2, \ldots, m)$

$$x'_i = \overset{\circ}{x}_i + \rho h'_i, \quad x''_i = \overset{\circ}{x}_i + \rho h''_i,$$

мы удовлетворим соотношениям (14.81), причем в силу равенств (14.77) будут справедливы равенства:

$$\rho(M', M_0) = \sqrt{(x_1' - \overset{\circ}{x}_1)^2 + (x_2' - \overset{\circ}{x}_2)^2 + \ldots + (x_m' - \overset{\circ}{x}_m)^2} = \\ = \rho\sqrt{(h_1')^2 + (h_2')^2 + \ldots + (h_m')^2} = \rho,$$

$$\rho(M'', M_0) = \sqrt{(x_1'' - \overset{\circ}{x}_1)^2 + (x_2'' - \overset{\circ}{x}_2)^2 + \ldots + (x_m'' - \overset{\circ}{x}_m)^2} = \\ = \rho\sqrt{(h_1'')^2 + (h_2'')^2 + \ldots + (h_m'')^2} = \rho.$$

Теперь уже нетрудно убедиться в том, что для случая, когда второй дифференциал (14.69), (14.70) представляет собой знакопеременную квадратичную форму, функция $u = f(M)$ не имеет экстремума в точке M_0.

Записывая для функции $u = f(M)$ разложение в окрестности точки M_0 по формуле Тейлора с остаточным членом в форме Пеано и беря это разложение в указанных выше точках M' и M'', мы получим вместо (14.75) следующие два разложения:

$$f(M') - f(M_0) = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m} a_{ik}(x_i' - \overset{\circ}{x}_i)(x_k' - \overset{\circ}{x}_k) + o(\rho^2), \quad (14.82)$$

$$f(M'') - f(M_0) = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m} a_{ik}(x_i'' - \overset{\circ}{x}_i)(x_i'' - \overset{\circ}{x}_k) + o(\rho^2), \quad (14.83)$$

справедливые для всех достаточно малых $\rho > 0$.

Подставляя в эти разложения значения $(x_i' - \overset{\circ}{x}_i)$ и $(x_i'' - \overset{\circ}{x}_i)$ из равенств (14.81) и учитывая, что $o(\rho^2) = \rho^2 \cdot \alpha(\rho)$, где $\alpha(\rho) \to 0$ при $\rho \to 0$, мы придадим разложениям (14.82) и (14.83) следующий вид:

$$f(M') - f(M_0) = \rho^2\left[\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m} a_{ik}h_i'h_k' + \alpha(\rho)\right],$$

$$f(M'') - f(M_0) = \rho^2\left[\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m} a_{ik}h_i''h_k'' + \alpha(\rho)\right].$$

Последние два соотношения можно также переписать в виде:

$$f(M') - f(M_0) = \rho^2\left[\frac{1}{2}\Phi(h_1', h_2', \ldots, h_m') + \alpha(\rho)\right], \quad (14.82^*)$$

$$f(M'') - f(M_0) = \rho^2\left[\frac{1}{2}\Phi(h_1'', h_2'', \ldots, h_m'') + \alpha(\rho)\right]. \quad (14.83^*)$$

Учитывая соотношения (14.78) и тот факт, что величины $\Phi(h_1', h_2', \ldots, h_m') > 0$ и $\Phi(h_1'', h_2'', \ldots, h_m'') < 0$ не зависят от ρ и вспоминая, что $\rho = \rho(M', M_0) = \rho(M'', M_0)$, мы получим из соотношений (14.82*) и (14.83*), что для как угодно малого $\rho > 0$ справедливы неравенства $f(M') > f(M_0)$ и $f(M'') < f(M_0)$, которые и доказывают отсутствие экстремума в точке M_0.

Теорема 14.16 полностью доказана.

Замечание 1. Если второй дифференциал два раза дифференцируемой в данной точке возможного экстремума M_0 функции $u = f(M)$ представляет собой в этой точке квазизнакоопределенную квадратичную форму, то нельзя сказать ничего определенного о наличии или отсутствии в этой точке локального экстремума.

Так, например, у каждой из двух функций $u_1 = x^3 + y^3$ и $u_2 = x^4 + y^4$ второй дифференциал в точке возможного экстремума $M_0(0, 0)$ тождественно равен нулю (т. е. представляет собой квазизнакоопределенную квадратичную форму), но только одна вторая из указанных двух функций имеет в этой точке локальный экстремум.

Для решения вопроса о локальном экстремуме для случая, когда второй дифференциал представляет собой квазизнакоопределенную квадратичную форму, следует привлечь дифференциалы более высоких порядков, но это выходит за рамки данного курса.

Замечание 2. *Требование $d^2u|_{M_0} \geqslant 0$ (соответственно $d^2u|_{M_0} \leqslant 0$) является необходимым условием локального минимума (максимума) в точке M_0 дважды дифференцируемой в этой точке функции $u = f(M)$.*

В самом деле, пусть, ради определенности, $u = f(M)$ имеет в точке M_0 локальный минимум, но условие $d^2u|_{M_0} \geqslant 0$ не выполнено. Тогда найдутся $h_1, h_2, \ldots, h_m$ такие, что

$$d^2u|_{M_0} = \sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m} \frac{\partial^2 f}{\partial x_i\, \partial x_k}(M_0) h_i h_k < 0.$$

Рассмотрим функцию $F(t) = f(\overset{\circ}{x}_1 + th_1, \overset{\circ}{x}_2 + th_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_m + th_m)$, заведомо определенную при всех t, достаточно малых по модулю. Функция $F(t)$ обязана иметь локальный минимум в точке $t = 0$, чему противоречит условие

$$F''(0) = d^2u|_{M_0} < 0.$$

3. Случай функции двух переменных. На практике часто встречается задача об экстремуме функции двух перемен-

ных $u = f(x, y)$. В этом пункте мы приведем результаты, относящиеся к этому случаю.

Обозначим частные производные $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$, $\frac{\partial^2 u}{\partial x\, \partial y}$, $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$ в некоторой точке $M_0(\overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y})$ символами a_{11}, a_{12}, a_{22} соответственно. Справедливо следующее утверждение.

Пусть функция двух переменных $u = f(x, y)$ один раз дифференцируема в окрестности точки $M_0(\overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y})$ и два раза дифференцируема в самой точке M_0 и пусть M_0 является точкой возможного экстремума. Тогда, если в точке M_0 выполнено условие $a_{11}a_{22} - a_{12}^2 > 0$, то функция $u = f(x, y)$ имеет в этой точке локальный экстремум (максимум при $a_{11} < 0$ и минимум при $a_{11} > 0$). Если же в точке M_0 $a_{11}a_{22} - a_{12}^2 < 0$, то функция $u = f(x, y)$ не имеет в этой точке локального экстремума[1].

Доказательство. Справедливость первой части сформулированного утверждения непосредственно вытекает из теоремы 14.16 и критерия Сильвестра знакоопределенности квадратичной формы, ибо

$$A_1 = a_{11},\ A_2 = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22} - a_{12}^2.$$

Докажем вторую часть утверждения. Итак, пусть в точке M_0 справедливо неравенство $a_{11}a_{22} - a_{12}^2 < 0$. Докажем, что в этом случае второй дифференциал d^2u в точке M_0 представляет собой знакопеременную форму. Рассмотрим сначала случай $a_{11} \neq 0$. Используя введенные выше обозначения

$$\rho = \sqrt{(x - \overset{\circ}{x})^2 + (y - \overset{\circ}{y})^2},\ h_1 = \frac{x - \overset{\circ}{x}}{\rho},\ h_2 = \frac{y - \overset{\circ}{y}}{\rho},$$

получим следующее выражение для второго дифференциала:

$$d^2u|_{M_0} = \rho^2 \sum_{i=1}^{2} \sum_{k=1}^{2} a_{ik} h_i h_k = \rho^2 (a_{11}h_1^2 + 2a_{12}h_1h_2 + a_{22}h_2^2) = \\ = \frac{\rho^2}{a_{11}} [(a_{11}h_1 + a_{12}h_2)^2 + (a_{11}a_{22} - a_{12}^2)h_2^2].$$

Легко проверить, что при $h_1 = 1$, $h_2 = 0$ и при $h_1 = \frac{a_{12}}{\sqrt{a_{11}^2 + a_{12}^2}}$, $h_2 = \frac{a_{11}}{\sqrt{a_{11}^2 + a_{12}^2}}$ [2] дифференциал $d^2u|_{M_0}$ имеет разные знаки,

[1] Случай $a_{11}a_{22} - a_{12}^2 = 0$ требует дополнительного исследования.

[2] При этом ρ может быть как угодно малой величиной. Условие $h_1^2 + h_2^2 = 1$ выполнено.

т. е. является знакопеременной формой, и поэтому, согласно теореме 14.16, функция не имеет в точке M_0 локального экстремума.

Рассмотрим теперь случай $a_{11} = 0$. Тогда из условия $a_{11}a_{22} - a_{12}^2 < 0$ вытекает, что $a_{12} \neq 0$. Следовательно, из написанного выше выражения для $d^2u|_{M_0}$ получится

$$d^2u|_{M_0} = \rho^2 h_2(2a_{12}h_1 + a_{22}h_2). \tag{14.84}$$

Пусть $h_1 \neq 0$ и величина h_2 столь мала (из условия $h_1^2 + h_2^2 = 1$ следует, что такой выбор h_1 и h_2 возможен), что выражение $(2a_{12}h_1 + a_{22}h_2)$ сохраняет знак величины $2a_{12}h_1$. Тогда из формулы (14.84) вытекает, что $d^2u|_{M_0}$ имеет разные знаки при $h_2 > 0$ и $h_2 < 0$, т. е. функция $u = f(x, y)$ не имеет локального экстремума в точке M_0. Утверждение полностью доказано.

4. Примеры исследования функции на экстремум. 1) Найти точки локального экстремума функции m переменных

$$u = \lambda x_1^2 + x_2^2 + \ldots + x_m^2 + 2x_2 + \ldots + 2x_m, \tag{14.85}$$

где λ — отличное от нуля вещественное число.

Для отыскания точек возможного экстремума получаем следующие уравнения:

$$\frac{\partial u}{\partial x_1} = 2\lambda x_1 = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial x_2} = 2x_2 + 2 = 0, \quad \ldots, \quad \frac{\partial u}{\partial x_m} = 2x_m + 2 = 0. \tag{14.86}$$

Из уравнений (14.86) заключаем, что единственной точкой возможного экстремума является точка $M_0(0, -1, \ldots, -1)$.

Чтобы исследовать функцию (14.85) в этой точке M_0 с помощью достаточных условий экстремума, вычислим второй дифференциал

$$d^2u|_{M_0} = 2\lambda(dx_1)^2 + 2(dx_2)^2 + \ldots + 2(dx_m)^2. \tag{14.87}$$

Очевидно, что при $\lambda > 0$ все значения второго дифференциала (14.87) при $dx_1, dx_2, \ldots, dx_m$, одновременно не равных нулю, являются строго положительными, т. е. при $\lambda > 0$ второй дифференциал (14.87) представляет собой положительно определенную квадратичную форму. Поэтому при $\lambda > 0$ функция (14.85) имеет в точке $M_0(0, -1, \ldots, -1)$ локальный минимум.

При $\lambda < 0$ второй дифференциал (14.87) положителен при $dx_1 = 0, \ldots, dx_{m-1} = 0$, $dx_m = 1$ и отрицателен при $dx_1 = 1$, $dx_2 = 0, \ldots, dx_m = 0$. Это означает, что при $\lambda < 0$ второй дифференциал (14.87) представляет собой знакопеременную квадратичную форму. Поэтому при $\lambda < 0$ функция (14.85) не имеет в точке $M_0(0, -1, \ldots, -1)$ локального экстремума.

2) На плоскости даны n точек $M_k(a_k, b_k)$, $k = 1, 2, \ldots, n$, в которых сосредоточены массы $m_k > 0$. Требуется найти на этой плоскости точку $M_0(x_0, y_0)$ такую, относительно которой момент инерции указанной системы материальных точек является минимальным.

Так как момент инерции указанной системы материальных точек относительно точки $M(x, y)$ равен

$$I(x, y) = \sum_{k=1}^{n} m_k[(x - a_k)^2 + (y - b_k)^2], \tag{14.88}$$

то задача сводится к отысканию точки $M_0(x_0, y_0)$, в которой функция (14.88) достигает своего минимального значения.

Для отыскания точек возможного экстремума функции (14.88) получаем следующие уравнения:

$$\frac{\partial I}{\partial x} = 2\sum_{k=1}^{n} m_k(x - a_k) = 0, \; \frac{\partial I}{\partial y} = 2\sum_{k=1}^{n} m_k(y - b_k) = 0. \tag{14.89}$$

Из уравнений (14.89) заключаем, что единственной точкой возможного экстремума функции (14.88) является точка $M_0(x_0, y_0)$, координаты которой равны

$$x_0 = \frac{m_1 a_1 + m_2 a_2 + \ldots + m_n a_n}{m_1 + m_2 + \ldots + m_n}, \; y_0 = \frac{m_1 b_1 + m_2 b_2 + \ldots + m_n b_n}{m_1 + m_2 + \ldots + m_n}. \tag{14.90}$$

Так как $a_{11} = \dfrac{\partial^2 I}{\partial x^2} = 2\sum\limits_{k=1}^{n} m_k > 0$, $a_{12} = \dfrac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} = 0$, $a_{22} = \dfrac{\partial^2 I}{\partial y^2} = 2\sum\limits_{k=1}^{n} m_k > 0$, то $a_{11}a_{22} - a_{12}^2 > 0$, и согласно утверждению, доказанному в п. 3, функция (14.88) имеет локальный минимум в точке $M_0(x_0, y_0)$ с координатами (14.90). Легко убедиться, что значение $I(x, y)$ в этой точке является минимальным. Заметим в заключение, что формулы (14.90) определяют координаты центра тяжести рассматриваемой системы материальных точек.

§ 7. Градиентный метод поиска экстремума сильно выпуклой функции

В этом параграфе излагается теория широко применяемого на практике градиентного метода поиска экстремума сильно выпуклой функции.

Идея этого метода чрезвычайно проста. Для приближенного отыскания точки минимума функции m переменных используется тот факт, что градиент этой функции имеет направление, совпадающее с направлением наибольшего возрастания

этой функции. Стало быть, вектор $-\operatorname{grad} f(x_0)$ в каждой точке $x_0 = (\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_m)$ направлен в сторону наибольшего убывания функции $f(x) = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$. Это дает основание ожидать, что если, отправляясь от некоторого нулевого приближения $x_0 = (\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_m)$, мы построим k-е приближение $x_k = (\overset{k}{x}_1, \overset{k}{x}_2, \ldots, \overset{k}{x}_m)$ по рекуррентной формуле

$$x_{k+1} = x_k - \alpha \operatorname{grad} f(x_k),$$

то при достаточно малом положительном α последовательность точек $\{x_k\}$ сойдется к точке минимума функции $f(x)$.

Строгой реализации этой простой идеи и посвящен настоящий параграф.

1. Выпуклые множества и выпуклые функции. Пусть $x_1 = (\overset{1}{x}_1, \overset{1}{x}_2, \ldots, \overset{1}{x}_m)$ и $x_2 = (\overset{2}{x}_1, \overset{2}{x}_2, \ldots, \overset{2}{x}_m)$ — две точки m-мерного евклидова пространства E^m, которые мы можем рассматривать как векторы в E^m с соответствующими координатами.

Назовем о т р е з к о м, соединяющим точки x_1 и x_2, множество точек пространства E^m вида $x_1 + t(x_2 - x_1)$, где t — любое число из сегмента $0 \leqslant t \leqslant 1$.

Будем обозначать отрезок, соединяющий точки x_1 и x_2, символом $\overline{x_1 x_2}$.

Определение 1. *Множество Q точек пространства E^m называется в ы п у к л ы м, если оно обладает следующим свойством: каковы бы ни были две точки x_1 и x_2, принадлежащие множеству Q, отрезок $\overline{x_1 x_2}$, их соединяющий, также принадлежит этому множеству.*

Примером выпуклого множества в пространстве E^m может служить m-мерный шар (безразлично, открытый или замкнутый) или полупространство $x_m \geqslant 0$ (т. е. множество всех точек $(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ пространства E^m, m-я координата которых удовлетворяет условию $x_m \geqslant 0$).

Примером множества Q, не являющегося выпуклым, может служить дополнение m-мерного шара или m-мерный шар, из которого удалена хотя бы одна точка.

Пусть Q — некоторое множество точек пространства E^m, а x — любая фиксированная точка этого пространства.

Назовем р а с с т о я н и е м от точки x до множества Q точную нижнюю грань расстояний от точки x до всевозможных точек этого множества.

Будем обозначать расстояние от точки x до множества Q символом $\rho(x, Q)$.

Итак, по определению

$$\rho(x, Q) = \inf_{y \in Q} \rho(x, y).$$

Для любого множества Q пространства E^m и любой точки x этого пространства существует расстояние $\rho(x, Q)$ [1]. В частности, если точка x принадлежит множеству Q, то $\rho(x, Q) = 0$.

Однако у множества Q не всегда существует точка y такая, что $\rho(x, y) = \rho(x, Q)$.

Так, например, если множество Q представляет открытый m-мерный шар, а x — точка E^m, лежащая вне этого шара, то у такого множества Q не существует точки y такой, что $\rho(x, y) = \rho(x, Q)$ (ибо для всех точек y открытого шара Q справедливо неравенство $\rho(x, y) > \rho(x, Q)$).

Если все же у множества Q существует точка y такая, что $\rho(x, y) = \rho(x, Q)$, то эта точка y называется проекцией точки x на множество Q.

Проекцию точки x на множество Q будем обозначать символом $P_Q(x)$.

Подчеркнем, что если точка x принадлежит множеству Q, то $P_Q(x) = x$.

Итак, проекция $P_Q(x)$ точки x на множество Q определяется соотношением

$$\rho(x, P_Q(x)) = \rho(x, Q) = \inf_{y \in Q} \rho(x, y).$$

Полезно отметить, что может существовать несколько проекций точки x на множество Q. Так, например, если Q — m-мерная сфера с центром в точке x, то любая точка Q является проекцией точки x на множество Q.

Справедлива, однако, следующая лемма.

Лемма 1. *Если множество Q пространства E^m является выпуклым и замкнутым, а x — любая точка E^m, то существует и притом единственная проекция точки x на множество Q.*

Доказательство. Сначала докажем существование хотя бы одной проекции точки x на множество Q. Обозначим $\rho(x, Q)$ расстояние от точки x до множества Q. По определению $\rho(x, Q)$ как точной нижней грани $\inf\limits_{y \in Q} \rho(x, y)$ найдется последовательность $\{y_n\}$ точек множества Q такая, что $\rho(x, y_n) \to \rho(x, Q)$.

По определению предела числовой последовательности для любого $\varepsilon > 0$ все элементы y_n, начиная с некоторого номера,

[1] Ибо множество $\rho(x, y)$ для всевозможных y, принадлежащих Q, всегда ограничено снизу (например, числом нуль).

удовлетворяют соотношению

$$\rho(x, Q) - \varepsilon < \rho(x, y_n) < \rho(x, Q) + \varepsilon.$$

Отсюда следует, что последовательность $\{y_n\}$ точек пространства E^m во всяком случае является ограниченной и потому в силу теоремы Больцано–Вейерштрасса (см. п. 2 § 2 гл. 14) из этой последовательности можно выделить сходящуюся подпоследовательность $\{y_{k_n}\}$, где $n = 1, 2, \ldots$ Обозначим через y предел подпоследовательности $\{y_{k_n}\}$. В силу замкнутости множества Q точка y принадлежит этому множеству. Остается доказать, что

$$\rho(x, y) = \rho(x, Q) = \lim_{n\to\infty} \rho(x, y_{k_n}).$$

Заметим, что в силу неравенств треугольника $\rho(x, y_{k_n}) \leqslant \rho(x, y) + \rho(y, y_{k_n})$ и $\rho(x, y) \leqslant \rho(x, y_{k_n}) + \rho(y_{k_n}, y)$ справедливо соотношение $|\rho(x, y_{k_n}) - \rho(x, y)| \leqslant \rho(y, y_{k_n})$. Из этого соотношения и из сходимости подпоследовательности $\{y_{k_n}\}$ к y вытекает, что $\lim\limits_{n\to\infty} (x, y_{k_n}) = \rho(x, y)$, т. е. $\rho(x, Q) = \rho(x, y)$.

Тем самым доказательство существования хотя бы одной проекции точки x на множество Q завершено.

Докажем теперь, что существует т о л ь к о о д н а проекция точки x на множество Q. Предположим, что существуют две р а з л и ч н ы е проекции y_1 и y_2 точки x на множество Q. Так как множество Q является выпуклым, то весь отрезок $\overline{y_1 y_2}$, соединяющий точки y_1 и y_2, принадлежит множеству Q. В частности, множеству Q принадлежит середина $\frac{y_1 + y_2}{2}$ указанного отрезка. Убедимся в том, что *расстояние* $\rho\left(x, \frac{y_1 + y_2}{2}\right)$ *от точки* x *до указанной середины отрезка* $\overline{y_1 y_2}$ *строго меньше расстояния* $\rho(x, y_1) = \rho(x, y_2)$.

Исключим из рассмотрения тривиальный случай, когда $\frac{y_1 + y_2}{2} = x$. В этом случае $\rho\left(x, \frac{y_1 + y_2}{2}\right) = 0$, в то время как $\rho(x, y_1) = \rho(x, y_2) > 0$, ибо иначе (т. е. в случае равенства $\rho(x, y_1) = \rho(x, y_2) = 0$) обе точки y_1 и y_2 совпадали бы с x и не могли быть различными. Итак, в тривиальном случае $\frac{y_1 + y_2}{2} = x$ неравенство

$$\rho\left(x, \frac{y_1 + y_2}{2}\right) < \rho(x, y_1) = \rho(x, y_2) \tag{14.91}$$

очевидно.

Докажем теперь неравенство (14.91) в случае, когда $\frac{y_1 + y_2}{2} \neq x$.

Используя свойства скалярного произведения двух векторов пространства E^m [1], мы получим соотношение

$$\rho^2\left(x, \frac{y_1+y_2}{2}\right) = \left(\frac{y_1+y_2}{2} - x, \frac{y_1+y_2}{2} - x\right) =$$
$$= \left(\frac{y_1-x}{2} + \frac{y_2-x}{2}, \frac{y_1-x}{2} + \frac{y_2-x}{2}\right) =$$
$$= \frac{1}{4}[(y_1-x, y_1-x) + 2(y_1-x, y_2-x) + (y_2-x, y_2-x)]. \quad (14.92)$$

Убедимся теперь в справедливости строгого неравенства

$$|(y_1-x, y_2-x)| < \sqrt{(y_1-x, y_1-x)} \cdot \sqrt{(y_2-x, y_2-x)}. \quad (14.93)$$

Для этого воспользуемся тем, что для любых векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ пространства E^m, не коллинеарных друг другу (т. е. таких, что $\mathbf{a} \neq \lambda\mathbf{b}$ ни для одного вещественного λ), справедливо строгое неравенство Коши–Буняковского [2]

$$|(\mathbf{a}, \mathbf{b})| \leqslant \sqrt{(\mathbf{a}, \mathbf{a}) \cdot (\mathbf{b}, \mathbf{b})}.$$

Это означает, что для доказательства неравенства (14.93) нам достаточно убедиться в том, что векторы $y_1 - x$ и $y_2 - x$ не коллинеарны, т. е. убедиться в том, что ни для одного вещественного λ не может быть справедливо равенство

$$y_1 - x = \lambda(y_2 - x). \quad (14.94)$$

Если бы равенство (14.94) было справедливо для такого λ, для которого $|\lambda| \neq 1$, то было бы невозможно равенство $\rho(y_1, x) = \rho(y_2, x)$.

Справедливость равенства (14.94) для $\lambda = +1$ противоречила бы тому, что точки y_1 и y_2 являются различными.

Наконец, справедливость равенства (14.94) для $\lambda = -1$ означала бы, что $\frac{y_1+y_2}{2} = x$, а этот случай мы исключили.

Итак, равенство (14.94) не справедливо ни для одного вещественного λ, а потому доказательство неравенства (14.93) завершено.

---

[1] См., например, § 1 гл. 4 книги В.А. Ильина и Э.Г. Позняка «Линейная алгебра», Изд-во «Наука», 1978.

[2] В самом деле, при $\mathbf{a} \neq \lambda\mathbf{b}$ вектор $(\mathbf{a} - \lambda\mathbf{b})$ не является нулевым. Поэтому квадратный трехчлен $(\mathbf{a} - \lambda\mathbf{b}, \mathbf{a} - \lambda\mathbf{b}) = (\mathbf{a}, \mathbf{a}) - 2\lambda(\mathbf{a}, \mathbf{b}) + \lambda^2(\mathbf{b}, \mathbf{b})$ строго положителен и его дискриминант $4[(\mathbf{a}, \mathbf{b})^2 - (\mathbf{a}, \mathbf{a}) \cdot (\mathbf{b}, \mathbf{b})]$ строго отрицателен.

Сопоставляя равенство (14.92) с неравенством (14.93), получим, что

$$\rho^2\left(x, \frac{y_1+y_2}{2}\right) < \\ < \frac{1}{4}[(y_1-x, y_1-x) + 2\sqrt{(y_1-x, y_1-x)(y_2-x, y_2-x)} + \\ + (y_2-x, y_2-x)] = \frac{1}{4}\left[\sqrt{(y_1-x, y_1-x)} + \sqrt{(y_2-x, y_2-x)}\right]^2 = \\ = \frac{1}{4}[\rho(x, y_1) + \rho(x, y_2)]^2 = \rho^2(x, y_1) = \rho^2(x, y_2).$$

Тем самым доказательство неравенства (14.91) завершено. Но это неравенство означает, что у множества Q нашлась точка $\frac{y_1+y_2}{2}$, более близкая к x, чем точки y_1 и y_2, а это противоречит тому, что каждая из точек y_1 и y_2 является проекцией точки x на множество Q, т. е. является точной нижней гранью расстояния $\rho(x, y)$ для всевозможных y, принадлежащих Q.

Полученное противоречие показывает, что предположение о том, что существуют две различные проекции y_1 и y_2 точки x на множество Q, является ошибочным.

Доказательство леммы 1 полностью завершено.

Перейдем теперь к определению выпуклой функции.

Определение 2. *Функция $f(x)$, заданная на выпуклом множестве Q пространства E^m, называется выпуклой вниз или просто выпуклой на этом множестве, если для любых двух точек x_1 и x_2 множества Q и для любого вещественного числа t из сегмента $0 \leqslant t \leqslant 1$ справедливо неравенство*

$$f[x_2 + t(x_2 - x_1)] \leqslant f(x_1) + t[f(x_2) - f(x_1)]. \tag{14.95}$$

Определение 3. *Функция $f(x)$, заданная на выпуклом множестве Q пространства E^m, называется строго выпуклой на этом множестве, если для любых двух точек x_1 и x_2 множества Q и для любого вещественного числа t из интервала $0 < t < 1$ справедливо строгое неравенство*

$$f[x_2 + t(x_2 - x_1)] < f(x_1) + t[f(x_2) - f(x_1)]. \tag{14.96}$$

Ясно, что всякая строго выпуклая на множестве Q функция $f(x)$ является выпуклой на этом множестве.

Легко установить достаточное условие выпуклости (соответственно строгой выпуклости) дважды дифференцируемой на выпуклом множестве Q функции $f(x)$.

Всюду в дальнейшем мы будем предполагать, что множество Q имеет хотя бы одну внутреннюю точку.

Лемма 2. *Пусть функция $f(x)$ задана и два раза дифференцируема на выпуклом множестве Q. Тогда для того, чтобы эта функция являлась выпуклой (строго выпуклой) на множестве Q, достаточно, чтобы второй дифференциал $d^2 f$ этой функции во всех точках Q являлся квазиположительно определенной (строго положительно определенной) квадратичной формой.*

Доказательство. Пусть x_1 и x_2 — любые две фиксированные точки множества Q. Рассмотрим на сегменте $0 \leqslant t \leqslant 1$ следующую функцию одной независимой переменной t:

$$F(t) = f[x_1 + t(x_2 - x_1)] - f(x_1) - t[f(x_2) - f(x_1)]. \tag{14.97}$$

Напомним, что второй дифференциал $d^2 f$ функции $f(x) = f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$ m независимых переменных $x_1, x_2, \ldots, x_m$ в данной точке $x = (x_1, x_2, \ldots, x_m)$ равен [1])

$$d^2 f(x) = \sum_{i=1}^{m} \sum_{k=1}^{m} \frac{\partial^2 f}{\partial x_i\, \partial x_k}(x) \cdot \Delta x_i \cdot \Delta x_k. \tag{14.98}$$

Дифференцируя функцию (14.97) два раза по t по правилу дифференцирования сложной функции, получим

$$F''(t) = \sum_{i=1}^{m} \sum_{k=1}^{m} \frac{\partial^2 f}{\partial x_i\, \partial x_k}[x_1 + t(x_2 - x_1)] \left(\overset{2}{x}_i - \overset{1}{x}_i\right) \left(\overset{2}{x}_k - \overset{1}{x}_k\right), \tag{14.99}$$

где $(\overset{1}{x}_1, \overset{1}{x}_2, \ldots, \overset{1}{x}_m)$ и $(\overset{2}{x}_1, \overset{2}{x}_2, \ldots, \overset{2}{x}_m)$ — координаты точек x_1 и x_2 соответственно.

Сопоставляя соотношения (14.98) и (14.99), мы убедимся в справедливости равенства

$$F''(t) = d^2 f[x_1 + t(x_2 - x_1)], \tag{14.100}$$

где в выражении для $d^2 f$ приращения Δx_i взяты равными $\overset{2}{x}_i - \overset{1}{x}_i$.

Дальнейшие рассуждения, ради определенности, проведем для случая, когда второй дифференциал $d^2 f$ во всех точках Q является квазиположительно определенной квадратичной формой. В этом случае для всех t из сегмента $0 \leqslant t \leqslant 1$ правая (а, стало быть, и левая) часть (14.100) неотрицательна, т. е. для всех t из сегмента $0 \leqslant t \leqslant 1$

$$F''(t) \geqslant 0. \tag{14.101}$$

[1]) См. п. 2 § 5 гл. 14.

В силу определения 2 и соотношения (14.97) нам достаточно доказать, что для всех t из сегмента $0 \leqslant t \leqslant 1$ справедливо неравенство

$$F(t) \leqslant 0. \tag{14.102}$$

Для доказательства неравенства (14.102) используем соотношение (14.101) и легко проверяемые равенства

$$F(0) = 0, \quad F(1) = 0. \tag{14.103}$$

Предположим, что внутри сегмента $0 \leqslant t \leqslant 1$ существует хотя бы одна точка t, в которой $F(t) > 0$. Тогда функция $F(t)$ достигает своего максимального на сегменте $0 \leqslant t \leqslant 1$ значения в некоторой внутренней точке t_0 этого сегмента, причем $F(t_0) > 0$. В этой точке t_0 функция $F(t)$ имеет локальный максимум, а потому $F'(t_0) = 0$. Но из неравенства (14.101) вытекает, что производная $F'(t)$ не убывает на всем сегменте $0 \leqslant t \leqslant 1$, а потому и на сегменте $t_0 \leqslant t \leqslant 1$. Отсюда и из условия $F'(t_0) = 0$ следует, что производная $F'(t)$ неотрицательна всюду на сегменте $t_0 \leqslant t \leqslant 1$, а поэтому функция $F(t)$ не убывает на этом сегменте. Это приводит нас к неравенству

$$F(1) \geqslant F(t_0) > 0,$$

противоречащему второму соотношению (14.103).

Полученное противоречие доказывает, что предположение о том, что на сегменте $0 \leqslant t \leqslant 1$ существует хотя бы одна точка t, в которой $F(t) > 0$, является ошибочным, т. е. доказывает справедливость всюду на сегменте $0 \leqslant t \leqslant 1$ неравенства (14.102).

Тем самым первая часть леммы (о выпуклости $f(x)$ при условии, что $d^2 f$ является квазиположительно определенной квадратичной формой) доказана.

Вторая часть леммы (о строгой выпуклости $f(x)$ при условии, что $d^2 f$ является строго положительно определенной квадратичной формой) доказывается аналогично. Исходя из неравенства (14.101), справедливого на этот раз со знаком $>$, и из равенств (14.103) и предположив, что внутри сегмента $0 \leqslant t \leqslant 1$ существует хотя бы одна точка t, в которой $F(t) \geqslant 0$, мы придем к выводу, что $F(t)$ имеет внутри сегмента $0 \leqslant t \leqslant 1$ точку локального максимума t_0, причем $F(t_0) \geqslant 0$. Но тогда, поскольку $F'(t_0) = 0$, из (14.101) получим, что $F'(t) > 0$ всюду на полуинтервале $t_0 < t \leqslant 1$, а это означает, что $F(1) > F(t_0) \geqslant 0$.

Мы снова получаем противоречие со вторым соотношением (14.103), которое доказывает, что $F(t) < 0$ всюду на интервале $0 < t < 1$, т. е. доказывает строгую выпуклость $f(x)$ на множестве Q.

Лемма 2 полностью доказана.

Доказанная лемма естественно наводит на мысль о рассмотрении следующего еще более узкого класса выпуклых на выпуклом множестве Q и два раза дифференцируемых на этом множестве функций.

Определение 4. *Два раза дифференцируемая на выпуклом множестве Q функция $f(x)$ называется* с и л ь н о   в ы п у к л о й *на этом множестве, если существуют такие две положительные постоянные k_1 и k_2, что второй дифференциал $d^2 f$ этой функции, определяемый соотношением* (14.98), *во всех точках x множества Q удовлетворяет неравенствам*

$$k_1 \cdot (\Delta x)^2 \leqslant d^2 f \leqslant k_2 \cdot (\Delta x)^2. \tag{14.104}$$

(В этих неравенствах через Δx обозначен вектор с координатами $(\Delta x_1, \Delta x_2, \ldots, \Delta x_m)$, а символ $(\Delta x)^2$ обозначает скалярный квадрат этого вектора.)

Из левого неравенства (14.104) сразу же вытекает, что второй дифференциал сильно выпуклой функции представляет собой строго положительно определенную во всех точках множества Q функцию, а потому (в силу леммы 2) *сильно выпуклая на множестве Q функция заведомо является строго выпуклой на этом множестве.*

Вместе с тем класс сильно выпуклых функций достаточно широк и важен в прикладных задачах, и мы ограничимся этим классом при изложении теории градиентного метода поиска минимума.

Начнем с выяснения вопроса о существовании и о единственности минимума.

2. Существование минимума у сильно выпуклой функции и единственность минимума у строго выпуклой функции. Пусть функция $f(x)$ определена на выпуклом множестве Q. Будем говорить, что эта функция имеет в точке x_0 множества Q л о к а л ь н ы й   м и н и м у м, если существует такая δ-окрестность этой точки x_0, что значение $f(x_0)$ является наименьшим среди значений $f(x)$ этой функции во всех точках пересечения δ-окрестности x_0 и множества Q.

При таком определении понятие локального минимума включает в себя и точки краевого минимума функции $f(x)$ на границе множества Q.

Таким образом, при данном нами определении можно подразделить точки минимума на точки внутреннего локального минимума (для случая, когда эти точки являются внутренними точками Q) и точки краевого локального минимума (для случая, когда эти точки являются граничными точками Q).

Для изучения вопроса о существовании и единственности точки локального минимума нам понадобится следующая вспомогательная теорема.

Лемма 3. *Пусть на выпуклом множестве Q задана дифференцируемая выпуклая функция $f(x)$. Для того чтобы эта функция имела локальный минимум в точке x_0 множества Q, необходимо и достаточно, чтобы для любого вектора Δx, для которого точка $x_0 + \Delta x$ принадлежит множеству Q, было справедливо неравенство*[1]

$$(\operatorname{grad} f(x_0), \Delta x) \geqslant 0. \tag{14.105}$$

Доказательство. 1) Необходимость. В силу утверждения, доказанного в п. 6 § 4 гл. 14, левая часть (14.105) равна произведению производной функции $f(x)$ в точке x_0 по направлению вектора Δx на длину $|\Delta x|$ этого вектора:

$$(\operatorname{grad} f(x_0), \Delta x) = \frac{\partial f}{\partial e}(x_0)|\Delta x|, \tag{14.106}$$

где $e = \dfrac{\Delta x}{|\Delta x|}$ — единичный вектор в направлении Δx.

Так как x_0 является точкой локального минимума функции $f(x)$, то производная $\dfrac{\partial f}{\partial e}(x_0)$ по любому направлению $e = \dfrac{\Delta x}{|\Delta x|}$ неотрицательна (точнее, равна нулю в случае, если x_0 — точка внутреннего локального экстремума, и неотрицательна в случае, если x_0 — точка краевого локального экстремума).

Итак, правая часть (14.106) (а потому и левая часть (14.105)) неотрицательна. Необходимость доказана.

2) Достаточность. Пусть для любого вектора Δx, для которого точка $x_0 + \Delta x$ принадлежит Q, справедливо неравенство (14.105). Докажем, что точка x_0 является точкой локального минимума функции $f(x)$.

Так как функция $f(x)$ по условию является выпуклой на множестве Q, то для любых двух точек x_1 и x_2 этого множества и любого числа t из сегмента $0 \leqslant t \leqslant 1$ справедливо неравенство (14.95). Полагая в этом неравенстве $x_1 = x_0$, $x_2 = x_0 + \Delta x$, можно переписать это неравенство в виде

$$f(x_0 + \Delta x) - f(x_0) \geqslant \frac{f(x_0 + t\Delta x) - f(x_0)}{t}. \tag{14.107}$$

Считая x_0 и Δx фиксированными, перейдем в неравенстве (14.107) к пределу при $t \to 0 + 0$. По определению производной по направлению (см. п. 6 § 4 гл. 14) предел при $t \to 0 + 0$

[1] В неравенстве (14.105) берется скалярное произведение векторов $\operatorname{grad} f(x_0)$ и Δx. Определение $\operatorname{grad} f(x_0)$ см. в п. 6 § 4 гл. 14.

правой части (14.107) в точности равен произведению, стоящему в правой части (14.106). Поэтому в силу соотношений (14.105) и (14.106) этот предел неотрицателен. Учитывая, что левая часть (14.107) не зависит от t, мы получим в пределе при $t \to 0+0$ из неравенства (14.107), что

$$f(x_0 + \Delta x) - f(x_0) \geqslant 0.$$

Последнее неравенство, справедливое для любого вектора Δx, для которого точка $x_0 + \Delta x$ принадлежит Q, доказывает, что функция $f(x)$ имеет в точке x_0 локальный минимум. Достаточность доказана.

Лемма 3 полностью доказана.

З а м е ч а н и е 1. Из приведенного нами доказательства очевидно, что для случая, когда точка x_0 является в н у т р е н н е й точкой множества Q, т. е. когда речь идет о внутреннем локальном минимуме, в формулировке леммы 3 знак $\geqslant$ в неравенстве (14.105) можно заменить на знак $=$.

З а м е ч а н и е 2. При доказательстве необходимости леммы 3 мы не использовали требования выпуклости функции $f(x)$. Поэтому доказательство необходимости проходит без требования выпуклости функции $f(x)$. Иными словами, справедливо следующее у т в е р ж д е н и е: *если функция $f(x)$ дифференцируема на выпуклом множестве Q и имеет локальный минимум во внутренней (в граничной) точке x_0 этого множества, то для любого вектора Δx, для которого точка $x_0 + \Delta x$ принадлежит Q, справедливо неравенство*

$$(\operatorname{grad} f(x_0), \Delta x) = 0 \quad [(\operatorname{grad} f(x_0), \Delta x) \geqslant 0].$$

Перейдем к вопросу о единственности и о существовании точки локального минимума.

Теорема (о единственности локального минимума у строго выпуклой функции). *Если функция $f(x)$ дифференцируема и строго выпукла на выпуклом множестве Q, то она может иметь локальный минимум только в одной точке этого множества.*

Д о к а з а т е л ь с т в о. Предположим, что функция $f(x)$ имеет локальный минимум в двух р а з л и ч н ы х точках x_1 и x_2 множества Q. Тогда условие выпуклости (14.95) для точек x_1 и x_2 можно записать в виде

$$f(x_2) - f(x_1) \geqslant \frac{f[x_1 + t(x_2 - x_1)] - f(x_1)}{t} \tag{14.108}$$

(здесь t — любое число из сегмента $0 \leqslant t \leqslant 1$).

Меняя в соотношении (14.108) точки x_1 и x_2 ролями, мы получим неравенство

$$f(x_1) - f(x_2) \geqslant \frac{f[x_2 + t(x_1 - x_2)] - f(x_2)}{t}. \tag{14.109}$$

В пределе при $t \to 0+0$ правая часть (14.108) (соответственно правая часть (14.109)) дает производную функции $f(x)$ по направлению вектора $x_2 - x_1$ (соответственно вектора $x_1 - x_2$), взятую в точке x_1 (соответственно в точке x_2), умноженную на $|x_2 - x_1|$. Так как обе точки x_1 и x_2 являются точками локального минимума, то обе указанные производные по направлению неотрицательны, т. е. пределы правых частей (14.108) и (14.109) при $t \to 0+0$ оба неотрицательны.

Таким образом, из неравенств (14.108) и (14.109) в пределе при $t \to 0+0$ мы получим

$$f(x_2) - f(x_1) \geqslant 0, \quad f(x_1) - f(x_2) \geqslant 0.$$

Сопоставление последних неравенств приводит нас к заключению о том, что $f(x_1) = f(x_2)$.

Используя равенство $f(x_1) = f(x_2)$, мы получим из условия строгой выпуклости (14.96), что

$$f[x_1 + t(x_2 - x_1)] < f(x_1) \tag{14.110}$$

для всех t из интервала $0 < t < 1$.

Неравенство (14.110) противоречит тому, что функция $f(x)$ имеет локальный минимум в точке x_1 (в точке $x_1 + t(x_2 - x_1)$, как угодно близкой при малом t к точке x_1, функция $f(x)$ имеет значение, меньшее значения $f(x_1)$).

Полученное противоречие доказывает, что наше предположение о том, что функция $f(x)$ имеет локальный минимум в двух различных точках множества Q, является ошибочным. Теорема доказана.

Существование локального минимума докажем при более сильных ограничениях, чем единственность.

Теорема (о существовании локального минимума у сильно выпуклой функции). *Если функция $f(x)$ сильно выпукла на замкнутом выпуклом множестве Q, то у этой функции существует на множестве Q точка x_0 локального минимума*[1]*.*

Доказательство. Сначала отметим, что теорема заведомо справедлива для случая, когда выпуклое замкнутое множество Q является, кроме того, ограниченным. Тогда по второй теореме Вейерштрасса (см. теорему 14.7) функция $f(x)$, будучи во всяком случае непрерывной на множестве Q, достигает в некоторой точке x_0 этого множества своего минимального на Q значения. Указанная точка x_0 и является точкой локального минимума.

---

[1]) Так как сильно выпуклая на выпуклом множестве Q функция $f(x)$ является строго выпуклой на этом множестве, то по предыдущей теореме точка x_0 будет единственной точкой локального минимума.

Остается доказать теорему в случае, когда выпуклое замкнутое множество Q *не является ограниченным*. Фиксируем некоторую внутреннюю точку x_1 множества Q и разложим функцию $f(x)$ по формуле Тейлора с центром в точке x_1, взяв остаточный член $R_2(x)$ в форме Лагранжа [1] (см. п. 3 § 5 гл. 14). Указанное разложение будет иметь вид

$$f(x) = f(x_1) + df(x_1) + \frac{1}{2}d^2 f[x_1 + \theta(x - x_1)], \tag{14.111}$$

где θ — число из интервала $0 < \theta < 1$, так что точка $x_1+\theta(x-x_1)$ принадлежит отрезку, соединяющему точки x_1 и x [2].

Если обозначить Δx вектор $x - x_1$, то для $df(x_1)$ будет справедливо равенство:

$$df(x_1) = (\operatorname{grad} f(x_1), \Delta x).$$

Из этого равенства вытекает, что

$$|df(x_1)| \leqslant |\operatorname{grad} f(x_1)| \cdot |\Delta x|. \tag{14.112}$$

Далее, используя левое неравенство в определении сильной выпуклости (14.104), мы придем к неравенству

$$d^2 f[x_1 + \theta(x - x_1)] \geqslant k_1 \cdot (\Delta x)^2. \tag{14.113}$$

Из соотношений (14.111)–(14.113) заключаем, что

$$f(x) - f(x_1) \geqslant -|df(x_1)| + \frac{1}{2}d^2 f[x_1 + \theta(x - x_1)] \geqslant$$
$$\geqslant -|\operatorname{grad} f(x_1)| \cdot |\Delta x| + \frac{k_1}{2}|\Delta x|^2,$$

так что

$$f(x) - f(x_1) \geqslant |\Delta x| \cdot \left[\frac{k_1}{2}|\Delta x| - |\operatorname{grad} f(x_1)|\right]. \tag{14.114}$$

Учитывая, что точка x_1 фиксирована и величина $|\operatorname{grad} f(x_1)|$ представляет собой некоторое фиксированное число, мы заведомо можем выбрать положительное число R настолько большим, чтобы при $|\Delta x| > R$ выражение в квадратных скобках в (14.114) было положительным.

---

[1] Мы учитываем, что сильно выпуклая на множестве Q функция $f(x)$ два раза дифференцируема на этом множестве.

[2] Какова бы ни была точка x множества Q, отрезок, соединяющий точки x_1 и x_2, принадлежит множеству Q в силу выпуклости этого множества. В сноске к теореме Тейлора 14.15 отмечалось, что в качестве окрестности центра разложения можно брать любую звездную окрестность этого центра, т. е. можно брать все множество Q.

Это означает, что при $|\Delta x| > R$ справедливо неравенство $f(x) > f(x_1)$, т. е. всюду вне замкнутого шара C_R радиуса R с центром в точке x_1 значения $f(x)$ превосходят значение $f(x_1)$ (в центре указанного шара).

Обозначим Q_R пересечение множества Q с указанным шаром C_R. Так как оба множества Q и C_R являются выпуклыми и замкнутыми, то и их пересечение Q_R также является выпуклым и замкнутым. Так как, кроме того, множество Q_R является ограниченным, то по доказанному выше функция $f(x)$ имеет на множестве Q_R единственную точку x_0 локального минимума.

Поскольку мы доказали, что во всех точках Q, лежащих за пределами Q_R, значения $f(x)$ превосходят $f(x_1)$, то эти значения тем более превосходят $f(x_0)$, т. е. точка x_0 является точкой локального минимума $f(x)$ и на всем множестве Q. Теорема полностью доказана.

3. Поиск минимума сильно выпуклой функции. Мы доказали, что сильно выпуклая функция $f(x)$, заданная на замкнутом выпуклом множестве Q, имеет на этом множестве единственную точку x_0 локального минимума.

Обратимся к построению и обоснованию алгоритма, с помощью которого отыскивается эта точка x_0.

Фиксируем произвольную точку x_1 множества Q и произвольное число α, удовлетворяющее неравенствам

$$0 < \alpha < 2/k_2, \tag{14.115}$$

где k_2 — постоянная из неравенства (14.104), определяющего сильную выпуклость функции $f(x)$.

Отправляясь от x_1 как от первого приближения, составим итерационную последовательность $\{x_k\}$ с помощью рекуррентного соотношения

$$x_{k+1} = P_Q(x_k - \alpha \operatorname{grad} f(x_k)), \quad k = 1, 2, \ldots \tag{14.116}$$

В настоящем пункте мы докажем следующее утверждение.

Основная теорема. *Пусть функция $f(x)$ является сильно выпуклой на замкнутом выпуклом множестве Q и пусть x_1 — произвольная точка множества Q. Тогда итерационная последовательность $\{x_k\}$, определяемая рекуррентным соотношением* (14.116) *при любом α, удовлетворяющем неравенствам* (14.115), *сходится к точке x_0 локального минимума функции $f(x)$.*

Подчеркнем, что эта теорема дает алгоритм отыскания любого (внутреннего или краевого) локального минимума функции $f(x)$, являющейся сильно выпуклой на произвольном (не обязательно ограниченном) замкнутом выпуклом множестве Q.

Доказательству основной теоремы предпошлем четыре леммы.

Лемма 4. *Если Q — выпуклое замкнутое множество точек E^m, x — произвольная фиксированная точка E^m, а y — произвольная точка Q, то*

$$(x - P_Q(x),\; y - P_Q(x)) \leqslant 0. \tag{14.117}$$

Доказательство. Предположим, что неравенство (14.117) несправедливо. Тогда существует точка y множества Q такая, что

$$(x - P_Q(x),\; y - P_Q(x)) > 0. \tag{14.118}$$

Из (14.118) сразу же вытекает, что точка y не совпадает с $P_Q(x)$.

В силу выпуклости множества Q любая точка $z = P_Q(x) + t(y - P_Q(x))$ отрезка, соединяющего точки $P_Q(x)$ и y, принадлежит множеству Q. Вычислим расстояние между любой такой точкой z и точкой x

$$\rho^2(z,x) = (x - P_Q(x) - t(y - P_Q(x)), x - P_Q(x) - t(y - P_Q(x))) = \\ = \rho^2(x, P_Q(x)) - 2t(x - P_Q(x), y - P_Q(x)) + t^2\rho^2(y, P_Q(x)). \tag{14.119}$$

Так как x и y фиксированы, а t — любое число из сегмента $0 \leqslant t \leqslant 1$, то в силу неравенства (14.118) можно взять t удовлетворяющим неравенству

$$0 < t < \frac{2(x - P_Q(x),\, y - P_Q(x))}{\rho^2(y, P_Q(x))}.$$

При таком выборе t

$$-2t(x - P_Q(x), y - P_Q(x)) + t^2\rho^2(y, P_Q(x)) < 0,$$

и мы получим из (14.119), что $\rho^2(z,x) < \rho^2(x, P_Q(x))$. Последнее неравенство противоречит тому, что точка $P_Q(x)$ является проекцией точки x на множество Q: у множества Q нашлась точка z, удаленная от x меньше, чем $P_Q(x)$ от x. Полученное противоречие завершает доказательство леммы.

Лемма 5. *Пусть $f(x)$ дифференцируема и выпукла на замкнутом выпуклом множестве Q. Если при некотором положительном α проекция $P_Q(x_0 - \alpha\cdot\operatorname{grad} f(x_0))$ точки $x_0 - \alpha\cdot\operatorname{grad} f(x_0)$ на множество Q совпадает с точкой x_0 этого множества, то функция $f(x)$ имеет в точке x_0 локальный минимум.*

Доказательство. Используя лемму 4, запишем неравенство (14.117) для точек $x = x_0 - \alpha\cdot\operatorname{grad} f(x_0)$ и $y = x_0 +$

$+\Delta x$, где Δx — любой вектор, для которого точка $y = x_0 + \Delta x$ принадлежит Q. В результате получим

$$(x_0 - \alpha \cdot \operatorname{grad} f(x_0) - P_Q(x_0 - \alpha \cdot \operatorname{grad} f(x_0)),\\ x_0 + \Delta x - P_Q(x_0 - \alpha \cdot \operatorname{grad} f(x_0))) \leqslant 0.$$

Учитывая, что $P_Q(x_0 - \alpha \cdot \operatorname{grad} f(x_0)) = x_0$, получим из последнего неравенства следующее соотношение:

$$(\operatorname{grad} f(x_0),\ \Delta x) \geqslant 0.$$

Это соотношение, справедливое для любого вектора Δx, для которого точка $x_0 + \Delta x$ принадлежит Q, в силу леммы 3 устанавливает, что функция $f(x)$ имеет в точке x_0 локальный минимум. Лемма 5 доказана.

Предположим, что функция $f(x)$ является сильно выпуклой на ограниченном замкнутом выпуклом множестве Q. Обозначим m минимальное значение $f(x)$ на множестве Q, а μ — число, строго большее m, так что

$$\mu > m = \min_{x \in Q} f(x).$$

Фиксируем число ν, строго большее μ, и обозначим $\widehat{Q}$ подмножество тех точек x множества Q, для которых

$$\mu \leqslant f(x) \leqslant \nu. \tag{14.120}$$

Множество $\widehat{Q}$ как подмножество ограниченного множества Q само является ограниченным.

Убедимся в том, что множество $\widehat{Q}$ является *замкнутым*. Пусть $\{x_k\}$ — произвольная сходящаяся последовательность точек множества $\widehat{Q}$. Требуется доказать, что предел x_0 [1]) этой последовательности также принадлежит множеству $\widehat{Q}$. Так как каждая точка x_k принадлежит множеству $\widehat{Q}$, то для каждого номера k

$$\mu \leqslant f(x_k) \leqslant \nu. \tag{14.121}$$

Строго выпуклая функция $f(x)$ во всяком случае непрерывна на Q, а поэтому из сходимости последовательности $\{x_k\}$ к x_0 в силу определения непрерывности функции вытекает сходимость последовательности $\{f(x_k)\}$ к числу $f(x_0)$. Так как все элементы сходящейся числовой последовательности $\{f(x_k)\}$ удовлетворяют неравенствам (14.121), то и предел $f(x_0)$ этой последовательности удовлетворяет неравенствам $\mu \leqslant f(x_0) \leqslant \nu$ (см. гл. 3,

[1]) Так как исходное множество Q является замкнутым, то предел x_0 во всяком случае принадлежит Q.

следствие 2 из теоремы 3.13), а это и означает, что точка x_0 принадлежит множеству $\widehat{Q}$. Доказательство замкнутости множества $\widehat{Q}$ завершено.

Итак, множество $\widehat{Q}$ всех точек x из множества Q, для которых справедливы неравенства (14.120), является замкнутым и ограниченным.

Докажем теперь следующую лемму.

Лемма 6. *Пусть функция $f(x)$ сильно выпукла на выпуклом замкнутом множестве Q, x — любая точка Q, α — любое положительное число, символ Δx обозначает разность*

$$\Delta x = P_Q(x - \alpha \cdot \operatorname{grad} f(x)) - x. \tag{14.122}$$

Тогда справедливо неравенство:

$$(\operatorname{grad} f(x), \Delta x) \leqslant \frac{1}{\alpha}|\Delta x|. \tag{14.123}$$

Если же, кроме того, множество Q ограничено и точка x принадлежит подмножеству $\widehat{Q}$ тех точек Q, для которых справедливы неравенства (14.120) *при $\mu > \min\limits_{x \in Q} f(x)$, то найдется строго положительное число γ такое, что справедливо неравенство*

$$|\Delta x| \geqslant \gamma. \tag{14.124}$$

Доказательство. Докажем сначала неравенство (14.123). Фиксируем произвольную точку x множества Q и, привлекая лемму 4, запишем неравенство (14.117), взяв в нем вместо x точку $x - \alpha \cdot \operatorname{grad} f(x)$, а вместо y точку x. При этом получим неравенство

$$(x - \alpha \cdot \operatorname{grad} f(x) - P_Q(x - \alpha \cdot \operatorname{grad} f(x)), x - P_Q(x - \alpha \cdot \operatorname{grad} f(x))) \leqslant 0,$$

которое с учетом обозначения $\Delta x = P_Q(x - \alpha \cdot \operatorname{grad} f(x)) - x$ перепишется в виде

$$(-\alpha \cdot \operatorname{grad} f(x) - \Delta x, -\Delta x) \leqslant 0.$$

Из последнего неравенства и из свойств скалярного произведения вытекает, что

$$\alpha(\operatorname{grad} f(x), \Delta x) + |\Delta x|^2 \leqslant 0,$$

а это и приводит к неравенству (14.123).

Остается доказать, что при дополнительном предположении о том, что Q ограничено и что x принадлежит подмножеству $\widehat{Q}$, существует $\gamma > 0$ такое, что справедливо неравенство (14.124).

Рассмотрим неотрицательную функцию точки x вида

$$|\Delta x| = |P_Q(x - \alpha \cdot \operatorname{grad} f(x)) - x|. \tag{14.125}$$

Убедимся в том, что эта функция является непрерывной на множестве Q функцией точки x.

Докажем сначала, что векторная функция $P_Q(x)$ является непрерывной функцией точки x. Для этого достаточно доказать неравенство

$$|P_Q(x + \Delta x) - P(x)| \leqslant |\Delta x|, \tag{14.126}$$

справедливое для любых векторов x и Δx.

В силу леммы 4 справедливы неравенства

$$(x - P_Q(x), P_Q(x + \Delta x) - P_Q(x)) \leqslant 0,$$
$$(x + \Delta x - P_Q(x + \Delta x), P_Q(x) - P_Q(x + \Delta x)) \leqslant 0.$$

Используя эти неравенства и неравенство Коши–Буняковского, получим цепочку соотношений

$$\begin{aligned}
|P_Q(x + \Delta x) - P_Q(x)|^2 &= \\
&= (P_Q(x + \Delta x) - P_Q(x), P_Q(x + \Delta x) - P_Q(x)) = \\
&= (P_Q(x + \Delta x) - x, P_Q(x + \Delta x) - P_Q(x)) + \\
&\quad + (x - P_Q(x), P_Q(x + \Delta x) - P_Q(x)) \leqslant \\
&\leqslant (P_Q(x + \Delta x) - x, P_Q(x + \Delta x) - P_Q(x)) = \\
&= (P_Q(x + \Delta x) - x - \Delta x, P_Q(x + \Delta x) - P_Q(x)) + \\
&\quad + (\Delta x, P_Q(x + \Delta x) - P_Q(x)) \leqslant (\Delta x, P_Q(x + \Delta x) - P_Q(x)) \leqslant \\
&\leqslant |\Delta x| \cdot |P_Q(x + \Delta x) - P_Q(x)|,
\end{aligned}$$

из которой и вытекает неравенство (14.126).

Итак, доказано, что $P_Q(x)$ является непрерывной векторной функцией точки x. Из сильной выпуклости $f(x)$ на Q вытекает, что функция $\alpha \cdot \operatorname{grad} f(x)$ также является непрерывной на Q векторной функцией точки x. Но тогда из теоремы о непрерывности сложной функции и непрерывности разности непрерывных функций вытекает, что и функция

$$P_Q(x - \alpha \cdot \operatorname{grad} f(x)) - x$$

является непрерывной на множестве Q векторной функцией точки x.

Модуль указанной векторной функции, т. е. скалярная функция (14.125), тем более является непрерывной на множестве Q, а потому и на его подмножестве $\widehat{Q}$.

Итак, функция (14.125) непрерывна и неотрицательна всюду на замкнутом ограниченном множестве $\widehat{Q}$. В таком случае по второй теореме Вейерштрасса (см. теорему 14.7) эта функция достигает на множестве $\widehat{Q}$ своего неотрицательного минимального значения γ. Указанное минимальное значение γ заведомо строго положительно, ибо если бы γ равнялось нулю, то на множестве $\widehat{Q}$ нашлась бы точка x_0 такая, что $P_Q(x_0 - \alpha \cdot \operatorname{grad} f(x_0)) - x_0 = 0$, а это означало бы в силу леммы 5, что в этой точке x_0 множества $\widehat{Q}$ функция $f(x)$ имеет единственный на множестве Q локальный минимум (в то время как этот минимум по определению $\widehat{Q}$ лежит вне $\widehat{Q}$). Итак, $\gamma > 0$, и неравенство (14.124) доказано.

Лемма 6 полностью доказана.

Лемма 7. *Пусть функция $f(x)$ сильно выпукла на выпуклом замкнутом множестве Q, x — любая точка Q, α — любое число, удовлетворяющее неравенствам* (14.115), *Δx — разность вида* (14.122). *Тогда при переходе из точки x в точку $x^* = P_Q(x - \alpha \cdot \operatorname{grad} f(x))$ значение функции $f(x)$ не возрастает, причем*[1])

$$f(x) - f(x^*) \geqslant \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{k_2}{2}\right)|\Delta x|^2. \qquad (14.127)$$

Если же, кроме того, множество Q ограничено и точка x принадлежит подмножеству $\widehat{Q}$ тех точек Q, для которых справедливо неравенство (14.120) *при $\mu > \min\limits_{x \in Q} f(x)$, то неравенство* (14.127) *переходит в неравенство*

$$f(x) - f(x^*) \geqslant \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{k_2}{2}\right)\gamma^2, \qquad (14.128)$$

где $\gamma > 0$ — постоянная из леммы 6.

Доказательство. Достаточно для любой точки x множества Q установить неравенство (14.127), ибо из этого неравенства и из неравенства (14.124) сразу вытекает и неравенство (14.128) (для точек x, принадлежащих $\widehat{Q}$, при условии, что Q ограничено).

Сначала докажем неравенство (14.127) для случая, когда точка x является внутренней точкой множества Q. Имея в виду, что точка $x^* = P_Q(x - \alpha \cdot \operatorname{grad} f(x))$ принадлежит мно-

---

[1]) Из (14.115) вытекает, что $\left(\frac{1}{\alpha} - \frac{k_2}{2}\right) > 0$.

жеству Q, на котором функция $f(x)$ сильно выпукла, выразим значение $f(x^*)$ по формуле Тейлора с центром в точке x, взяв остаточный член $R_2(x^*)$ в форме Лагранжа. При этом получим

$$f(x^*) = f(x) + (\operatorname{grad} f(x), \Delta x) + \frac{1}{2}d^2 f(x + \theta\Delta x), \qquad (14.129)$$

где $\Delta x = x^* - x = P_Q(x - \alpha \cdot \operatorname{grad} f(x)) - x$, $0 < \theta < 1$.

Используя неравенство (14.123) и правое неравенство (14.104), мы получим из формулы Тейлора (14.129)

$$f(x^*) - f(x) \leqslant -\frac{1}{\alpha}|\Delta x|^2 + \frac{k_2}{2} \cdot |\Delta x|^2,$$

так что для случая внутренней точки x неравенство (14.127) доказано.

Пусть теперь x является *граничной* точкой множества Q. По определению граничной точки найдется последовательность $\{x_n\}$ внутренних точек множества Q, сходящаяся к x.

Для каждой точки x_n по формуле Тейлора с центром в этой точке мы получим

$$f(x^*) = f(x_n) + (\operatorname{grad} f(x_n), x^* - x_n) + \frac{1}{2}d^2 f[x_n + \theta_n(x^* - x_n)], \qquad (14.130)$$

где $0 < \theta_n < 1$.

Учитывая, что правое неравенство (14.104) справедливо для $d^2 f$ в любой точке множества Q и что $\operatorname{grad} f(x)$ является непрерывной векторной функцией точки x на множестве Q, мы получим, что в пределе при $n \to \infty$ из соотношения (14.130) вытекает справедливость неравенства (14.127) для граничной точки x множества Q.

Лемма 7 доказана.

Перейдем теперь непосредственно к доказательству основной теоремы.

Сначала докажем основную теорему при дополнительном предположении о том, что замкнутое выпуклое множество Q является также *ограниченным*.

Возьмем произвольную точку x_1 множества Q и составим итерационную последовательность $\{x_n\}$ точек, определяемых рекуррентным соотношением (14.116), при условии, что число α удовлетворяет неравенствам (14.115).

Из леммы 7, а точнее из неравенства (14.127), сразу же вытекает, что

$$f(x_k) - f(x_{k+1}) \geqslant \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{k_2}{2}\right) \cdot |x_k - x_{k+1}|^2 \geqslant 0.$$

Таким образом, последовательность $\{f(x_k)\}$ является невозрастающей. Так как, кроме того, эта последовательность ограниче-

на снизу (минимальным значением m функции $f(x)$ на множестве Q), то она является сходящейся (см. теорему 3.15 из гл. 3). Обозначим предел последовательности $\{f(x_n)\}$ через μ. Ясно, что $\mu \geqslant m$, где m — минимальное значение $f(x)$ на множестве Q. Кроме того, поскольку все члены невозрастающей сходящейся последовательности не меньше ее предела (см. замечание 3 к теореме 3.15, гл. 3), то *для всех* номеров k справедливо неравенство

$$f(x_k) \geqslant \mu. \tag{14.131}$$

Докажем, что для предела μ справедливо равенство $\mu = m = \min\limits_{x \in Q} f(x)$.

Предположим, что это равенство несправедливо, т. е. предположим, что $\mu > m$. Тогда, если обозначить через ν максимальное значение $f(x)$ на множестве Q, а $\widehat{Q}$ — подмножество тех точек Q, для которых справедливы неравенства (14.120), то в силу леммы 7 найдется строго положительная постоянная γ такая, что справедливо неравенство (14.128), которое приводит к следующему неравенству:

$$f(x_k) - f(x_{k+1}) \geqslant \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{k_2}{2}\right)\gamma^2 > 0, \tag{14.132}$$

справедливому для любого номера k.

Суммируя неравенства (14.132), записанные для номеров k, равных $1, 2, 3, \ldots, (n-1)$, мы получим, что для любого номера n

$$f(x_1) - f(x_n) \geqslant (n-1)\left(\frac{1}{\alpha} - \frac{k_2}{2}\right)\gamma^2$$

или, что то же самое,

$$f(x_n) \leqslant f(x_1) - (n-1)\left(\frac{1}{\alpha} - \frac{k_2}{2}\right)\gamma^2. \tag{14.132$'$}$$

Неравенства (14.132$'$), справедливые для любого номера n, противоречат неравенству (14.131), ибо величина, стоящая в правой части (14.132$'$), при достаточно большом номере n становится меньше числа μ.

Полученное противоречие доказывает ошибочность предположения $\mu > m$, т. е. доказывает, что $\mu = m$. Итак, доказано, что последовательность $\{f(x_k)\}$ сходится к минимальному значению m функции $f(x)$ на множестве Q.

Остается доказать, что сама итерационная последовательность $\{x_k\}$ сходится к той точке x_0, в которой это минимальное значение достигается [1]).

---

[1]) Нами уже доказано, что минимальное значение функции $f(x)$ на множестве Q достигается в единственной точке этого множества.

Фиксируем произвольное положительное число ε и обозначим через C_ε открытый m-мерный шар радиуса ε с центром в точке x_0. Далее обозначим через $\widehat{Q}_\varepsilon$ ту часть множества Q, которая не содержит точек шара C_ε. Ясно, что $\widehat{Q}_\varepsilon$ — замкнутое ограниченное множество, так что функция $f(x)$ достигает (в силу второй теоремы Вейерштрасса) своего минимального на этом множестве значения, которое мы обозначим через m_ε.

Можно утверждать, что $m_\varepsilon > m$, ибо в противном случае нарушалось бы условие существования у функции $f(x)$ на множестве Q единственной точки локального минимума.

Далее можно утверждать, что на множестве $\widehat{Q}_\varepsilon$ имеется лишь к о н е ч н о е число точек последовательности $\{x_k\}$ (ибо последовательность $\{f(x_k)\}$, у которой имеется бесконечное число элементов, удовлетворяющих неравенству $f(x_k) \geqslant m_\varepsilon > m$, не может сходиться к числу m).

Стало быть, мы доказали, что для любого $\varepsilon > 0$ найдется номер N, начиная с которого все элементы последовательности $\{x_k\}$ лежат в шаре C_ε радиуса ε с центром в точке x_0. Это и означает, что последовательность $\{x_k\}$ сходится к точке x_0.

Тем самым, для случая ограниченного замкнутого выпуклого множества Q основная теорема доказана.

Пусть теперь Q — н е о г р а н и ч е н н о е замкнутое выпуклое множество. Снова фиксируем произвольную точку x_1 этого множества и составим итерационную последовательность (14.116) при условии, что число α удовлетворяет неравенствам (14.115).

При доказательстве теоремы о существовании локального минимума у сильно выпуклой функции (см. п. 2) мы установили, что точка x_0 локального минимума сильно выпуклой функции $f(x)$ на неограниченном замкнутом выпуклом множестве Q лежит в той части Q_R множества Q, которая содержится в шаре C_R с центром в точке x_1, радиус R которого выбран из условия

$$\frac{k_1}{2}R - |\operatorname{grad} f(x_1)| > 0.$$

Там же установлено, что подмножество Q_R множества Q является ограниченным выпуклым замкнутым множеством и что всюду вне Q_R значения $f(x)$ превосходят $f(x_1)$.

Так как в силу леммы 7 (а точнее в силу неравенства (14.127)) последовательность $\{f(x_k)\}$ является невозрастающей, а за пределами Q_R все значения $f(x)$ превосходят $f(x_1)$, то *все точки итерационной последовательности* $\{x_k\}$ *лежат в* Q_R, а потому для любого номера k

$$P_Q(x_k - \alpha \cdot \operatorname{grad} f(x_k)) = P_{Q_R}(x_k - \alpha \cdot \operatorname{grad} f(x_k)).$$

Стало быть, итерационную последовательность (14.116) можно заменить на

$$x_{k+1} = P_{Q_R}(x_k - \alpha \cdot \operatorname{grad} f(x_k)),$$

после чего все дальнейшие рассуждения сведутся к ограниченному замкнутому выпуклому множеству Q_R, т. е. к уже рассмотренному выше случаю.

Основная теорема полностью доказана.

Замечание 1. Особенно просто выглядит последовательность (14.116) для случая, когда множество Q совпадает со всем пространством E^m. В этом случае для любой точки x справедливо равенство $P_Q(x) = x$, и потому рекуррентная формула (14.116) принимает вид

$$x_{k+1} = x_k - \alpha \cdot \operatorname{grad} f(x_k).$$

Замечание 2. Изложенный нами метод позволяет при выполнении соответствующих условий искать решение $x_0 = (\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_m)$ системы m функциональных уравнений:

$$\begin{aligned} f_1(x) &= f_1(x_1, x_2, \ldots, x_m) = 0, \\ f_2(x) &= f_2(x_1, x_2, \ldots, x_m) = 0, \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ f_m(x) &= f_m(x_1, x_2, \ldots, x_m) = 0. \end{aligned}$$

Достаточно заметить, что решение указанной системы совпадает с точкой локального минимума функции

$$f(x) = f_1^2(x) + f_2^2(x) + \ldots + f_m^2(x).$$

Замечание 3. Изложенная нами теория отыскания локального минимума сильно выпуклой (вниз) функции без каких-либо осложнений переносится на отыскание локального максимума сильно выпуклой (вверх) функции.

ДОПОЛНЕНИЕ

О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗБИЕНИЯ СЕГМЕНТА ДЛЯ ПРИБЛИЖЕННОГО ВЫЧИСЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛА

В гл. 12 для приближенного вычисления интеграла

$$\int_a^b f(x)\,dx \tag{14.133}$$

мы разбивали сегмент $[a, b]$ на достаточно большое число n равных частичных сегментов и на каждом из этих сегментов заменяли функцию $f(x)$ многочленом нулевого, первого или второго порядка. Возникшая при этом погрешность никак не учитывала индивидуальных свойств $f(x)$. Поэтому,

естественно, встает вопрос о варьировании точек разбиения основного сегмента $[a, b]$ и выборе для каждой фиксированной функции $f(x)$ такого оптимального разбиения основного сегмента на n, вообще говоря, не равных друг другу частичных сегментов, которое обеспечивало бы минимальную величину погрешности данной приближенной формулы.

В настоящем дополнении мы остановимся на решении указанного вопроса, принадлежащем А.Н. Тихонову и С.С. Гайсаряну [1]).

Для приближенного вычисления интеграла (14.133) разобьем сегмент $[a, b]$ на n частичных сегментов при помощи точек

$$a = x_0 < x_1 < x_2 < \ldots < x_n = b.$$

Длину k-го частичного сегмента $[x_{k-1}, x_k]$ $(k = 1, 2, \ldots, n)$ обозначим символом h_k, так что $h_k = x_k - x_{k-1}$.

Представив интеграл (14.133) в виде суммы интегралов

$$\int\limits_a^b f(x)\,dx = \sum_{k=1}^{n} \int\limits_{x_{k-1}}^{x_k} f(x)\,dx, \tag{14.134}$$

приблизим каждый из интегралов в правой части (14.134) с помощью одной из трех приближенных формул (прямоугольников, трапеций или парабол). Любую из указанных трех формул можно записать в виде

$$\int\limits_{x_{k-1}}^{x_k} f(x)\,dx = h_k \sum_{i=0}^{m-1} q_i f(x_k + t_i h_k) + R_{s,m,k}(f), \tag{14.135}$$

где узлы t_i и веса q_i $(i = 0, 1, \ldots, m-1)$ выбираются так, чтобы остаточный член $R_{s,m,k}(f)$ имел порядок h_k^s при некотором $s > 1$ [2]).

Вставляя (14.135) в (14.134), мы получим, что

$$\int\limits_a^b f(x)\,dx = \sum_{k=1}^{n} h_k \sum_{i=0}^{m-1} q_i f(x_k + t_i h_k) + R_{s,m}(f), \tag{14.136}$$

где

$$R_{s,m}(f) = \sum_{k=1}^{n} R_{s,m,k}(f). \tag{14.137}$$

Поставим вопрос о выборе такого разбиения $\{x_k\}$ сегмента $[a, b]$, при котором квадрат погрешности (14.137) достигал бы минимума при фиксированном числе точек разбиения n, фиксированной функции $f(x)$ и фиксированной приближенной формуле (14.135). При такой постановке вопроса квадрат погрешности $R^2_{s,m}(f)$ зависит только от выбора промежуточных точек разбиения, т. е. является функцией $(n-1)$ переменных $x_1, x_2, \ldots, x_{n-1}$, определенной в тетраэдре $a < x_1 < x_2 < \ldots < x_{n-1} < b$. Поскольку указанный тетраэдр является открытой областью, то минимум функции $R^2_{s,m}(f)$ в

[1]) См. работу А.Н. Тихонова и С.С. Гайсаряна «О выборе оптимальных сеток при приближенном вычислении квадратур» (Журнал вычислительной математики и математической физики, т. 9, № 5, 1969).

[2]) В частности, для формулы трапеций в (14.135) следует положить $m = 2$, $s = 2$, $t_0 = 0$, $t_1 = 1$, $q_0 = q_1 = 1/2$.

этом тетраэдре может, вообще говоря, и не достигаться (т. е. оптимального разбиения сегмента $[a, b]$ может, вообще говоря, и не существовать).

Можно, однако, доказать, что *если производная* $f^{(s)}(x)$ *сохраняет знак на сегменте* $[a, b]$, *то минимум квадрата погрешности* $R^2_{s,m}(f)$ *достигается на таком разбиении сегмента* $[a, b]$, *узлы* $\bar{x}_k$ *которого удовлетворяют* $(n-1)$ *уравнениям*

$$\frac{\partial R^2_{s,m}(f)}{\partial x_k} = 0 \ (k = 1, 2, \ldots \ldots, n-1) \qquad (14.138)$$

и дополнительным условиям $x_0 = a$, $x_n = b$ [1]).

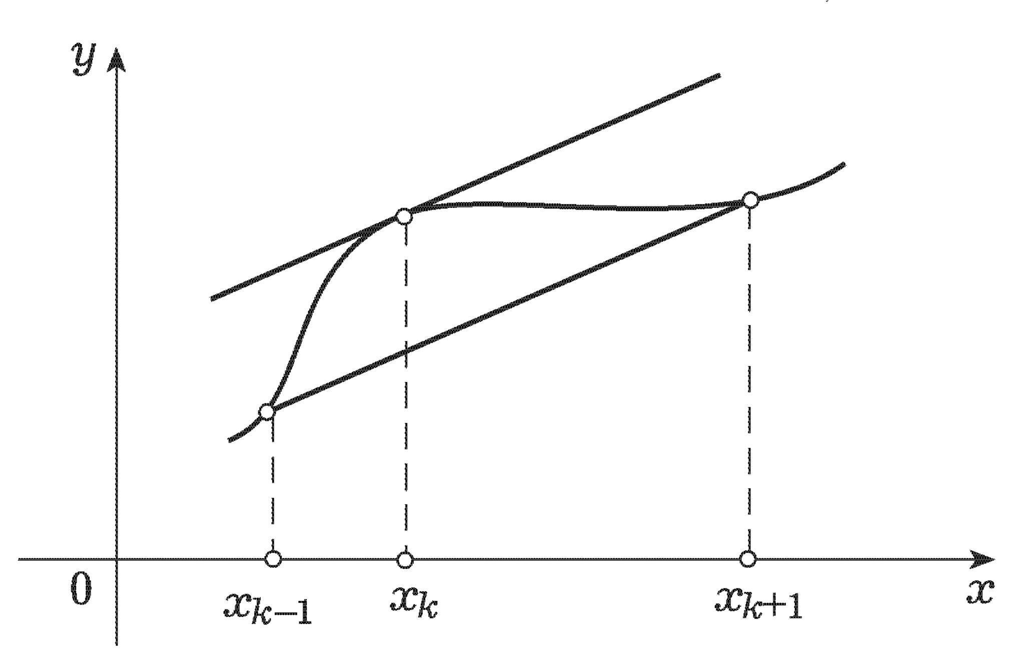


Рис. 14.4

Остановимся более подробно на случае формулы трапеций. В этом случае в формуле (14.136) следует положить $s = 2$, $m = 2$, $t_0 = 0$, $t_1 = 1$, $q_0 = q_1 = 1/2$, в результате чего формула (14.136) принимает вид

$$\int_a^b f(x)\,dx = \sum_{k=1}^{n} \frac{h_k}{2}[f(x_k) + f(x_k + h_k)] + R_{2,2}(f). \qquad (14.139)$$

Уравнения (14.138), в силу (14.139) и (14.134), приводятся для этого случая к виду

$$f(x_{k+1}) - f(x_{k-1}) = f'(x_k)(x_{k+1} - x_{k-1}) \quad (k = 1, 2, \ldots, n-1). \qquad (14.140)$$

Существование решения системы уравнений (14.140) обеспечивается сохранением знака второй производной $f''(x)$ на сегменте $[a, b]$, т. е. сохранением направления выпуклости кривой $y = f(x)$ при $a \leqslant x \leqslant b$. Узлы $\{\bar{x}_k\}$ оптимального разбиения сегмента $[a, b]$, определяемого уравнениями (14.140), обладают следующим геометрическим свойством: *секущая, проведенная через точки графика функции* $y = f(x)$ *с абсциссами* $\bar{x}_{k+1}$ *и* $\bar{x}_{k-1}$, *параллельна касательной к указанному графику, проведенной через его точку с абсциссой* $\bar{x}_k$.

Это свойство является прямым следствием равенств (14.140) и иллюстрируется на рис. 14.4 (рассуждения те же самые, что и в § 7 гл. 8).

Можно доказать, что узлы «приближенного разбиения» $\{\tilde{x}_k\}$ $(k = 0, 1, \ldots, n)$, определяемые рекуррентными равенствами

$$\tilde{x}_0 = a,\ \tilde{x}_{k+1} = \tilde{x}_k + \lambda |f''(\tilde{x}_k)|^{-1/3} \quad (k = 0, 1, \ldots, n-1), \qquad (14.141)$$

при $\lambda = (b-a)/n$ удовлетворяют уравнениям (14.140) с ошибкой (или, как говорят, с невязкой) порядка λ^2. Это означает, что при больших n разбиение $\{\tilde{x}_k\}$ близко к оптимальному разбиению $\{\bar{x}_k\}$. Таким образом, при больших n вычисление интеграла (14.133) по формуле трапеций с разбиением $\{\tilde{x}_k\}$, узлы которого последовательно определяются рекуррентными соотношениями (14.141), обеспечивает погрешность, близкую к минимальной.

[1]) Доказательство этого утверждения можно найти в работе А.Н. Тихонова и С.С. Гайсаряна, отмеченной в сноске [1]) на с. 566.

ГЛАВА 15

ТЕОРИЯ НЕЯВНЫХ ФУНКЦИЙ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

§ 1. Понятие неявной функции

В математике и в ее приложениях приходится сталкиваться с такими задачами, когда переменная u, являющаяся по смыслу задачи функцией аргументов $x, y, \ldots$, задается посредством функционального уравнения

$$F(u, x, y, \ldots) = 0. \tag{15.1}$$

В этом случае говорят, что u как функция аргументов $x, y, \ldots$ *задана неявно.* Так, например, функция $u = -\sqrt{1 - x^2 - y^2}$, рассматриваемая в круге $x^2 + y^2 \leqslant 1$, может быть неявно задана посредством функционального уравнения

$$F(u, x, y) = u^2 + x^2 + y^2 - 1 = 0. \tag{15.2}$$

Естественно, возникает вопрос, при каких условиях функциональное уравнение (15.1) *однозначно* разрешимо относительно u, т. е. *однозначно* определяет явную функцию $u = \varphi(x, y, \ldots)$, и более тонкий вопрос, при каких условиях эта явная функция является *непрерывной и дифференцируемой.* Эти вопросы не являются простыми. Так функциональное уравнение (15.2), вообще говоря, определяет в круге $x^2 + y^2 \leqslant 1$, кроме указанной выше явной функции $u = -\sqrt{1 - x^2 - y^2}$, бесконечно много других функций. Таковыми являются функция $u = +\sqrt{1 - x^2 - y^2}$, а также любая функция u, равная $+\sqrt{1 - x^2 - y^2}$ для некоторых точек (x, y) из круга $x^2 + y^2 \leqslant 1$ и равная $-\sqrt{1 - x^2 - y^2}$ для остальных точек этого круга. Для выяснения вопроса об условиях, обеспечивающих однозначную разрешимость уравнения (15.2) относительно u, обратимся к геометрической иллюстрации. Уравнение (15.2) определяет в пространстве (u, x, y)

сферу S радиуса 1 с центром в начале координат (рис. 15.1). Возьмем на сфере S точку $M_0(\overset{\circ}{u}, \overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y})$, не лежащую в плоскости Oxy, т. е. такую, для которой $\overset{\circ}{u} \neq 0$. Очевидно, часть сферы S, лежащая в достаточно малой окрестности точки M_0, *однозначно проецируется на плоскость Oxy*. Аналитически это означает, что если рассматривать функцию $F(u, x, y) = u^2 + x^2 + y^2 - 1$ только в указанной окрестности точки M_0, то уравнение (15.2) однозначно разрешимо относительно u и определяет единственную явную функцию $u = +\sqrt{1 - x^2 - y^2}$ при $\overset{\circ}{u} > 0$ и $u = -\sqrt{1 - x^2 - y^2}$ при $\overset{\circ}{u} < 0$.

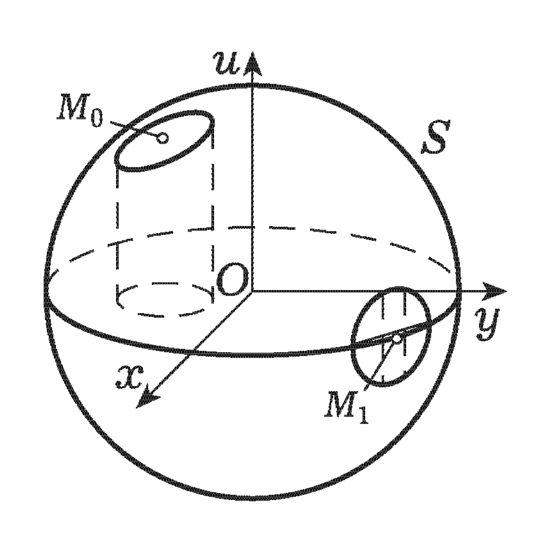


Рис. 15.1

Если же на сфере S взять точку $M_1(0, x, y)$, лежащую в плоскости Oxy (рис. 15.1), то очевидно, что часть сферы S, лежащая в *любой* окрестности M_1, *неоднозначно проецируется на плоскость Oxy*. Аналитически это означает, что если рассматривать функцию $F(u, x, y) = u^2 + x^2 + y^2 - 1$ в любой окрестности точки M_1, то уравнение (15.2) не является однозначно разрешимым относительно u. Обратим внимание на то, что частная производная $\dfrac{\partial F}{\partial u} = 2u$ функции $F(u, x, y) = u^2 + x^2 + y^2 - 1$ *не обращается в нуль в точке* M_0 и обращается в нуль в точке M_1. Ниже мы установим, что для однозначной разрешимости в окрестности точки M_0 общего функционального уравнения (15.1) относительно u принципиальную роль играет *необращение в нуль в точке M_0 частной производной* $\dfrac{\partial F}{\partial u}$. Попутно мы установим условия, при которых явная функция, представляющая собой единственное решение уравнения (15.1), является *непрерывной и дифференцируемой.*

В дальнейшем мы будем обозначать пространство переменных $(u, x, y, \ldots)$ символом R, а пространство переменных $(x, y, \ldots)$ символом R'. Ради сокращения записи и для удобства геометрической иллюстрации будем рассматривать две переменные x, y.

§ 2. Теорема о существовании и дифференцируемости неявной функции и некоторые ее применения

1. Теорема о существовании и дифференцируемости неявной функции.

Теорема 15.1. *Пусть функция $F(u, x, y)$ дифференцируема в некоторой окрестности точки $M_0(\overset{\circ}{u}, \overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y})$ пространства R,*

причем частная производная $\dfrac{\partial F}{\partial u}$ *непрерывна в точке* M_0. *Тогда, если в точке* M_0 *функция* F *обращается в нуль, а частная производная* $\dfrac{\partial F}{\partial u}$ *не обращается в нуль, то для любого достаточно малого положительного числа* ε *найдется такая окрестность точки* $M_0'(\overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y})$ *пространства* R', *что в пределах этой окрестности существует единственная функция* $u = \varphi(x, y)$, *которая удовлетворяет условию* $|u - \overset{\circ}{u}| < \varepsilon$ *и является решением уравнения*

$$F(u, x, y) = 0, \tag{15.3}$$

причем эта функция $u = \varphi(x, y)$ *непрерывна и дифференцируема в указанной окрестности точки* M_0'.

З а м е ч а н и е 1. В условиях теоремы 15.1 можно опустить требование непрерывности частной производной $\dfrac{\partial F}{\partial u}$ в точке M_0, но тогда придется дополнительно потребовать, чтобы эта производная не обращалась в нуль не только в самой точке M_0, но и в некоторой окрестности этой точки и сохраняла определенный знак в этой окрестности.

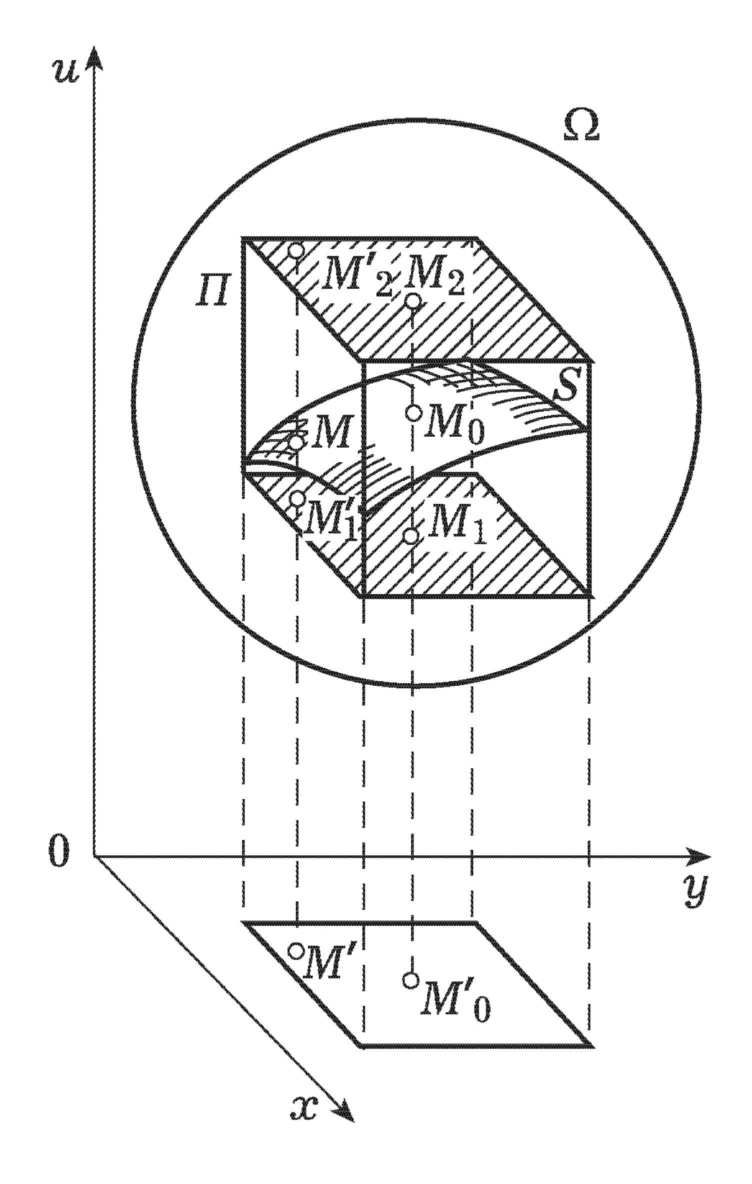


Рис. 15.2

Д о к а з а т е л ь с т в о теоремы 15.1.

1. Прежде всего докажем, что для достаточно малого $\varepsilon > 0$ *в окрестности точки* $M_0'(\overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y})$ *существует единственная функция* $u = \varphi(x, y)$, *удовлетворяющая условию* $|u - \overset{\circ}{u}| < < \varepsilon$ *и являющаяся решением уравнения* (15.3). Чтобы сделать доказательство более наглядным, будем сопровождать его геометрической иллюстрацией. Из аналитической геометрии известно, что уравнение (15.3) определяет в пространстве R некоторую поверхность S (рис. 15.2), причем, в силу условия $F(M_0) = 0$, точка M_0 лежит на этой поверхности. С геометрической точки зрения однозначная разрешимость уравнения (15.3) относительно u означает, что часть поверхности S, лежащая в непосредственной близости к точке M_0, может быть однозначно спроецирована на координатную плоскость Oxy.

Ради определенности будем считать, что частная производная $\dfrac{\partial F}{\partial u}$ *положительна* в точке M_0. Тогда из непрерывности указанной производной в M_0 и из теоремы об устойчивости знака непрерывной функции вытекает, что *найдется такая окрестность точки M_0, всюду в пределах которой $\dfrac{\partial F}{\partial u}$ положительна.*

Эту окрестность мы можем взять в виде шара Ω достаточно малого радиуса с центром в точке M_0. Фиксируем далее положительное число ε настолько малым, чтобы каждая из точек $M_1(\overset{\circ}{u}-\varepsilon, \overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y})$ и $M_2(\overset{\circ}{u}+\varepsilon, \overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y})$ лежала внутри шара Ω (для этого достаточно взять ε меньшим радиуса шара Ω.) Подчеркнем, что при этом снизу ε ограничено лишь нулем, и мы можем брать его как угодно малым — это будет использовано нами ниже.

Рассмотрим функцию $F(u, \overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y})$ одной переменной на сегменте $\overset{\circ}{u}-\varepsilon \leqslant u \leqslant \overset{\circ}{u}+\varepsilon$. С геометрической точки зрения это означает, что мы рассматриваем функцию трех переменных $F(u, x, y)$ вдоль отрезка M_1M_2 (см. рис. 15.2). Так как производная $\dfrac{\partial F}{\partial u}(u, \overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y})$ положительна на сегменте $\overset{\circ}{u}-\varepsilon \leqslant u \leqslant \overset{\circ}{u}+$ $+\varepsilon$, то функция $F(u, \overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y})$ *возрастает* на этом сегменте. Но тогда, поскольку эта функция равна нулю в середине указанного сегмента (т. е. при $u=\overset{\circ}{u}$), то $F(u, \overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y})$ *имеет отрицательное значение на левом конце и положительное значение на правом конце указанного сегмента*, т. е.

$$F(M_1) < 0, \ F(M_2) > 0.$$

Далее рассмотрим функции $F(\overset{\circ}{u}-\varepsilon, x, y)$ и $F(\overset{\circ}{u}+\varepsilon, x, y)$ двух переменных x и y, т. е., выражаясь геометрическим языком, рассмотрим функцию $F(u, x, y)$ на двух плоскостях, параллельных координатной плоскости Oxy, первая из которых проходит через точку M_1, а вторая — через точку M_2. Поскольку $F(M_1) < 0$, $F(M_2) > 0$ и функция $F(u, x, y)$ непрерывна всюду в шаре Ω, то по теореме об устойчивости знака непрерывной функции на указанных плоскостях найдутся *такие окрестности* точек M_1 и M_2, в пределах которых функция F сохраняет те же знаки, что и в точках M_1 и M_2. Эти окрестности мы можем взять в виде открытых квадратов с центрами в точках M_1 и M_2 и с достаточно малой стороной 2δ (на рис. 15.2 указанные квадраты заштрихованы). Тот факт, что функция $F(u, x, y)$ сохраняет постоянный знак на указанных квадратах, аналитически выра-

жается неравенствами

$$\left.\begin{aligned} F(\overset{\circ}{u}-\varepsilon, x, y) < 0, \\ F(\overset{\circ}{u}+\varepsilon, x, y) > 0 \end{aligned}\right\} \text{ при } |x-\overset{\circ}{x}| < \delta,\ |y-\overset{\circ}{y}| < \delta. \tag{15.4}$$

Выбор стороны указанных квадратов мы подчиним и еще одному условию: *возьмем δ столь малым, чтобы оба указанных квадрата лежали внутри шара* Ω (это заведомо можно сделать, ибо центры квадратов M_1 и M_2 являются внутренними точками шара Ω). При таком выборе δ любая точка пространства (u, x, y), координаты которой удовлетворяют неравенствам

$$|x-\overset{\circ}{x}| < \delta,\ |y-\overset{\circ}{y}| < \delta,\ |u-\overset{\circ}{u}| < \varepsilon, \tag{15.5}$$

будет лежать внутри шара Ω. С геометрической точки зрения неравенства (15.5) определяют открытый прямоугольный параллелепипед с центром в точке M_0 и со сторонами, параллельными осям координат u, x, y и соответственно равными 2ε, 2δ и 2δ. Этот параллелепипед мы будем обозначать символом Π. Так как параллелепипед Π лежит внутри шара Ω, *то всюду в параллелепипеде* Π [1]) *производная* $\dfrac{\partial F}{\partial u}$ *положительна.* Кроме того, в силу неравенств (15.4), функция $F(u, x, y)$ *отрицательна на нижнем основании и положительна на верхнем основании* Π.

Докажем теперь, что уравнение (15.3) однозначно разрешимо относительно u, если функцию $F(u, x, y)$ рассматривать лишь для значений u, x, y, лежащих внутри параллелепипеда Π. Уясним, что требуется доказать. Пусть $M'(x, y)$ — любая точка пространства R', координаты которой удовлетворяют неравенствам

$$|x-\overset{\circ}{x}| < \delta,\ |y-\overset{\circ}{y}| < \delta. \tag{15.6}$$

Иначе говоря, пусть $M'(x, y)$ — любая точка плоскости Oxy, лежащая внутри квадрата с центром в точке $M'_0(\overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y})$ и со сторонами, равными 2δ. Требуется доказать, что для координат x, y точки M' найдется, и притом *единственное*, число u из интервала $\overset{\circ}{u}-\varepsilon < u < \overset{\circ}{u}+\varepsilon$ такое, что $F(u, x, y) = 0$. (С геометрической точки зрения это означает, что любая прямая, параллельная оси u и пересекающая параллелепипед Π, пересекает поверхность S внутри параллелепипеда Π в одной и только в одной точке.)

Зафиксировав значения x и y, удовлетворяющие неравенствам (15.6), рассмотрим функцию $F(u, x, y)$ аргумента u на сег-

[1]) Включая открытые квадраты, лежащие в его основаниях.

менте $\overset{\circ}{u} - \varepsilon \leqslant u \leqslant \overset{\circ}{u} + \varepsilon$, т. е. рассмотрим функцию $F(u, x, y)$ на отрезке $M_1'M_2'$, где M_1' и M_2' — точки пересечения прямой, проходящей через точку $M'(x, y)$ и параллельной оси Ou, с основаниями параллелепипеда Π (см. рис. 15.2). Так как производная $\frac{\partial F}{\partial u}(u, x, y)$ положительна на сегменте $\overset{\circ}{u} - \varepsilon \leqslant u \leqslant \overset{\circ}{u} + \varepsilon$, то функция $F(u, x, y)$ возрастает на этом сегменте (или, что то же самое, возрастает на отрезке $M_1'M_2'$). Но тогда из условий $F(M_1') < 0$, $F(M_2') > 0$ вытекает, что внутри сегмента $\overset{\circ}{u} - \varepsilon \leqslant u \leqslant \overset{\circ}{u} + \varepsilon$ найдется одно единственное значение u такое, что $F(u, x, y) = 0$ (или, выражаясь геометрически, внутри отрезка $M_1'M_2'$ найдется единственная точка M, лежащая на поверхности S.)

Пусть теперь функция $u = \varphi(x, y)$ символизирует то правило, посредством которого каждой точке $M'(x, y)$ из окрестности (15.6) ставится в соответствие единственное число u из интервала $\overset{\circ}{u} - \varepsilon < u < \overset{\circ}{u} + \varepsilon$, для которого $F(u, x, y) = 0$. Мы доказали, что в окрестности (15.6) существует единственная функция $u = \varphi(x, y)$, удовлетворяющая условию $|u - \overset{\circ}{u}| < \varepsilon$ и являющаяся решением уравнения (15.3).

2. Докажем теперь, что *функция $u = \varphi(x, y)$ непрерывна в любой точке $M'(x, y)$ окрестности* (15.6). Так как для любой точки $M'(x, y)$ из окрестности (15.6) *выполнены те же условия*[1]), что и для точки $M_0'(\overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y})$, то достаточно доказать непрерывность функции $u = \varphi(x, y)$ *лишь в точке* $M_0'(\overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y})$. Требуется доказать, что для любого достаточно малого положительного ε существует положительное число δ такое, что для любых x и y, удовлетворяющих неравенствам $|x - \overset{\circ}{x}| < \delta$, $|y - \overset{\circ}{y}| < \delta$, справедливо неравенство $|u - \overset{\circ}{u}| < \varepsilon$, где $u = \varphi(x, y)$, $\overset{\circ}{u} = \varphi(\overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y})$. Если взять в качестве ε то число, которое выбрано выше при рассмотрении п. 1, то существование δ обеспечивается неравенствами (15.5). Остается заметить, что в рассуждениях п. 1 положительное число ε может быть взято *как угодно малым* (это отмечалось в п. 1).

Тем самым непрерывность функции $u = \varphi(x, y)$ установлена. Запишем *условие непрерывности* функции $u = \varphi(x, y)$ в точке $M_0'(\overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y})$ *в разностной форме.* Обозначая через Δu полное при-

---

[1]) Именно, любой точке $M'(x, y)$ из окрестности (15.6) соответствует точка $M(u, x, y)$ пространства R такая, что функция $F(u, x, y)$ обращается в нуль в точке M, дифференцируема в некоторой окрестности точки M и имеет в этой окрестности отличную от нуля частную производную $\frac{\partial F}{\partial u}$.

ращение функции $u = \varphi(x, y)$ в точке $M_0'(\overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y})$, соответствующее приращениям аргументов Δx и Δy, мы получим, что $\Delta u \to 0$ при $\begin{cases} \Delta x \to 0, \\ \Delta y \to 0. \end{cases}$

3. Остается доказать *дифференцируемость* функции $u = \varphi(x, y)$ в любой точке $M'(x, y)$ окрестности (15.6). В силу замечания, сделанного в п. 2, достаточно доказать дифференцируемость функции $u = \varphi(x, y)$ в самой точке $M_0'(\overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y})$. Чтобы это сделать, вычислим полное приращение Δu функции $u = \varphi(x, y)$ в точке $M_0'(\overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y})$, соответствующее приращениям аргументов Δx и Δy. Поскольку $F(\overset{\circ}{u}, \overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y}) = 0$ и $F(\overset{\circ}{u}+\Delta u, \overset{\circ}{x}+\Delta x, \overset{\circ}{y}+\Delta y) = 0$, то *полное приращение* ΔF *функции* $F(u, x, y)$ в точке $M_0(\overset{\circ}{u}, \overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y})$, соответствующее приращениям аргументов Δu, Δx и Δy, *равно нулю.* Но в силу условия дифференцируемости функции $F(u, x, y)$ в точке $M_0(\overset{\circ}{u}, \overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y})$ это полное приращение имеет вид

$$\Delta F = \left(\frac{\partial F}{\partial u} + \gamma\right)\Delta u + \left(\frac{\partial F}{\partial x} + \alpha\right)\Delta x + \left(\frac{\partial F}{\partial y} + \beta\right)\Delta y.$$

Здесь *все частные производные* $\dfrac{\partial F}{\partial u}$, $\dfrac{\partial F}{\partial x}$ и $\dfrac{\partial F}{\partial y}$ *берутся в точке* $M_0(\overset{\circ}{u}, \overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y})$; α, β и $\gamma \to 0$ при $\begin{cases} \Delta x \to 0, \\ \Delta y \to 0, \\ \Delta u \to 0. \end{cases}$

Итак, мы получаем

$$0 = \left(\frac{\partial F}{\partial u} + \gamma\right)\Delta u + \left(\frac{\partial F}{\partial x} + \alpha\right)\Delta x + \left(\frac{\partial F}{\partial y} + \beta\right)\Delta y. \tag{15.7}$$

Согласно разностной форме условия непрерывности функции $u = \varphi(x, y)$ в точке $M_0'(\overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y})$ $\Delta u \to 0$ при $\begin{cases} \Delta x \to 0, \\ \Delta y \to 0. \end{cases}$ Таким образом, можно утверждать, что из условия $\begin{cases} \Delta x \to 0, \\ \Delta y \to 0 \end{cases}$ следует, что α, β и $\gamma \to 0$.

По условию теоремы частная производная $\dfrac{\partial F}{\partial u}$ *отлична от нуля* в точке M_0. Поскольку $\gamma \to 0$ при $\begin{cases} \Delta x \to 0, \\ \Delta y \to 0, \end{cases}$ то *при достаточно малых* Δx *и* Δy выражение $\dfrac{\partial F}{\partial u} + \gamma$ *не обращается в нуль*. В таком случае формулу (15.7) можно поделить на $\left(\dfrac{\partial F}{\partial u} + \right.$ $\left. + \gamma\right)$, в результате чего мы получим

$$\Delta u = \left(-\frac{\dfrac{\partial F}{\partial x} + \alpha}{\dfrac{\partial F}{\partial u} + \gamma}\right) \Delta x + \left(-\frac{\dfrac{\partial F}{\partial y} + \beta}{\dfrac{\partial F}{\partial u} + \gamma}\right) \Delta y. \qquad (15.8)$$

По теореме о предельном значении частного двух функций можем утверждать, что

$$-\frac{\dfrac{\partial F}{\partial x} + \alpha}{\dfrac{\partial F}{\partial u} + \gamma} = -\frac{\dfrac{\partial F}{\partial x}}{\dfrac{\partial F}{\partial u}} + \mu, \quad -\frac{\dfrac{\partial F}{\partial u} + \beta}{\dfrac{\partial F}{\partial u} + \gamma} = -\frac{\dfrac{\partial F}{\partial y}}{\dfrac{\partial F}{\partial u}} + \nu, \qquad (15.9)$$

где μ и $\nu \to 0$ при $\begin{cases} \Delta x \to 0, \\ \Delta y \to 0. \end{cases}$

Сопоставляя формулы (15.8) и (15.9), окончательно получим

$$\Delta u = \left(-\frac{\dfrac{\partial F}{\partial x}}{\dfrac{\partial F}{\partial u}}\right) \Delta x + \left(-\frac{\dfrac{\partial F}{\partial y}}{\dfrac{\partial F}{\partial u}}\right) \Delta y + \mu \Delta x + \nu \Delta y. \qquad (15.10)$$

Формула (15.10) доказывает дифференцируемость функции $u = \varphi(x, y)$ в точке $M_0'(\overset{\circ}{x}, \overset{\circ}{y})$. Тем самым теорема 15.1 полностью доказана.

З а м е ч а н и е 2. Приведенное доказательство без всяких затруднений переносится на случай неявной функции, зависящей не от двух, а от любого конечного числа аргументов $x_1, x_2, \ldots, x_m$ [1]. Случай двух аргументов x и y имеет лишь то преимущество, что допускает наглядную геометрическую иллюстрацию в пространстве (u, x, y).

2. Вычисление частных производных неявно заданной функции. Остановимся на вычислении частных производных функции, неявно заданной посредством уравнения (15.3).

---

[1] И, в частности, от одного аргумента.

Пусть выполнены условия теоремы 15.1. Тогда для полного приращения функции $u = \varphi(x, y)$ справедливо представление (15.10). Это представление и теорема 14.9 позволяют утверждать, что частные производные функции $u = \varphi(x, y)$ определяются формулами

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\dfrac{\partial F}{\partial x}}{\dfrac{\partial F}{\partial u}}, \quad \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\dfrac{\partial F}{\partial y}}{\dfrac{\partial F}{\partial u}}. \tag{15.11}$$

Аналогичные формулы справедливы и для случая, когда неявно заданная функция зависит не от двух, а от любого конечного числа аргументов $x_1, x_2, \ldots, x_m$. В этом случае

$$\frac{\partial u}{\partial x_k} = -\frac{\dfrac{\partial F}{\partial x_k}}{\dfrac{\partial F}{\partial u}} \quad (k = 1, 2, \ldots, m).$$

Если мы хотим обеспечить существование у неявно заданной функции $u = \varphi(x, y)$ частных производных *второго* порядка, то, естественно, приходится усилить требования, наложенные на функцию $F(u, x, y)$ в теореме 15.1, а именно: приходится дополнительно требовать, чтобы функция $F(u, x, y)$ была два раза дифференцируема в рассматриваемой точке. В этих предположениях остановимся на вычислении *частных производных второго порядка.*

Введем полезное в дальнейшем понятие полной частной производной функции. Предположим, что нам дана дифференцируемая функция трех аргументов $\Phi(u, x, y)$, причем один из этих аргументов u сам является дифференцируемой функцией двух других аргументов x и y Тогда функцию $\Phi(u, x, y)$ можно рассматривать как сложную функцию двух аргументов x, y. Частные производные этой сложной функции по x и y будем называть *полными частными производными функции* $\Phi(u, x, y)$ *по* x *и* y и обозначать символами $\dfrac{D\Phi}{Dx}$ и $\dfrac{D\Phi}{Dy}$. По правилу дифференцирования сложной функции мы получим следующие формулы для указанных полных частных производных:

$$\frac{D\Phi}{Dx} = \frac{\partial \Phi}{\partial u}\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad \frac{D\Phi}{Dy} = \frac{\partial \Phi}{\partial u}\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial \Phi}{\partial y}.$$

Переходим к вычислению частных производных второго порядка неявно заданной функции. Ради определенности вычислим производную $\dfrac{\partial^2 u}{\partial y \partial x}$. Дифференцируя первую из формул (15.11) по y и принимая во внимание, что каждая из частных производных $\dfrac{\partial F}{\partial x}$ и $\dfrac{\partial F}{\partial u}$ зависит от трех аргументов u, x, y, первый из

которых сам является функцией x и y, будем иметь

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y \partial x} = \frac{D\left[-\dfrac{\dfrac{\partial F}{\partial x}}{\dfrac{\partial F}{\partial u}}\right]}{Dy} = \frac{-\dfrac{\partial F}{\partial u}\dfrac{D\left[\dfrac{\partial F}{\partial x}\right]}{Dy} + \dfrac{\partial F}{\partial x}\dfrac{D\left[\dfrac{\partial F}{\partial u}\right]}{Dy}}{\left(\dfrac{\partial F}{\partial u}\right)^2} =$$

$$= \frac{-\dfrac{\partial F}{\partial u}\left(\dfrac{\partial^2 F}{\partial x \partial u}\dfrac{\partial u}{\partial y} + \dfrac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}\right) + \dfrac{\partial F}{\partial x}\left(\dfrac{\partial^2 F}{\partial u^2}\dfrac{\partial u}{\partial y} + \dfrac{\partial^2 F}{\partial u \partial y}\right)}{\left(\dfrac{\partial F}{\partial u}\right)^2}.$$

Вставляя в полученную формулу выражение $\dfrac{\partial u}{\partial y}$, определяемое второй из формул (15.11), окончательно будем иметь

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y \partial x} = \frac{\dfrac{\partial^2 F}{\partial x \partial u}\dfrac{\partial F}{\partial y}\dfrac{\partial F}{\partial u} - \dfrac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}\left(\dfrac{\partial F}{\partial u}\right)^2 - \dfrac{\partial^2 F}{\partial u^2}\dfrac{\partial F}{\partial x}\dfrac{\partial F}{\partial y} + \dfrac{\partial^2 F}{\partial y \partial u}\dfrac{\partial F}{\partial x}\dfrac{\partial F}{\partial u}}{\left(\dfrac{\partial F}{\partial u}\right)^3}. \tag{15.12}$$

Совершенно аналогично вычисляются частные производные $\dfrac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ и $\dfrac{\partial^2 u}{\partial y^2}$. Аналогичным методом могут быть вычислены и частные производные третьего и последующих порядков [1]).

П р и м е р ы. 1) Вычислить частную производную $\dfrac{\partial^2 u}{\partial y \partial x}$ функции $u = \varphi(x, y)$, заданной посредством уравнения

$$x + y + u - e^{-(x+y+u)} = 0.$$

Прежде всего, пользуясь формулами (15.11), вычислим частные производные первого порядка

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1 + e^{-(x+y+u)}}{1 + e^{-(x+y+u)}} = -1.$$

Далее очевидно, что $\dfrac{\partial^2 u}{\partial y \partial x} = 0$.

2) Тот же вопрос для функции, заданной уравнением

$$u^2 + x^2 + y^2 - a^2 = 0.$$

[1]) При условии, что функция $F(u, x, y)$ дифференцируема в данной точке соответствующее число раз.

Используя формулы (15.11), получим

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{x}{u}, \quad \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{y}{u}.$$

Далее, будем иметь

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y \partial x} = \frac{D\left(\dfrac{\partial u}{\partial x}\right)}{Dy} = \frac{D\left(-\dfrac{x}{u}\right)}{Dy} = \frac{x\dfrac{\partial u}{\partial y}}{u^2} = -\frac{xy}{u^3}.$$

3. Особые точки поверхности и плоской кривой. Рассмотрим некоторую поверхность S (плоскую кривую L), определяемую в заданной декартовой прямоугольной системе координат уравнением $F(x, y, z) = 0$ $(F(x, y) = 0)$. Относительно функции $F(x, y, z)$ $(F(x, y))$ предположим, что она имеет непрерывные частные производные первого порядка по всем аргументам всюду в некоторой окрестности любой точки поверхности S (кривой L). Будем называть данную точку поверхности S (кривой L) особой, если в этой точке обращаются в нуль все частные производные первого порядка функции

$$F(x, y, z) \quad (F(x, y)).$$

В окрестности особой точки нельзя применить к уравнению $F(x, y, z) = 0$ $(F(x, y) = 0)$ теорему 15.1, т. е. нельзя утверждать, что это уравнение разрешимо хотя бы относительно одной из переменных x, y, z (x, y). Таким образом, участок поверхности S (кривой L), прилегающий к особой точке, может не допускать однозначного проецирования ни на одну из координатных плоскостей (ни на одну из осей координат). Структура поверхности S (кривой L) в окрестности особой точки может быть очень сложной и требует дополнительного исследования.

Точки поверхности S (кривой L), не являющиеся особыми, принято называть *обыкновенными*. В окрестности обыкновенной точки действует теорема 15.1, так что прилегающий к обыкновенной точке участок поверхности S (кривой L) допускает однозначное проецирование хотя бы на одну из координатных плоскостей (хотя бы на одну из осей координат), что существенно облегчает исследование этого участка.

Примеры. 1. Найти особые точки кругового конуса $x^2 + y^2 - z^2 = 0$. Поскольку $F(x, y, z) = x^2 + y^2 - z^2$, то $\dfrac{\partial F}{\partial x} = 2x$, $\dfrac{\partial F}{\partial y} = 2y$, $\dfrac{\partial F}{\partial z} = -2z$. Единственной особой точкой является начало координат. Хорошо известно, что в окрестности этой точки поверхность конуса не может быть однозначно спроецирована ни на одну из координатных плоскостей (рис. 15.3).

2. Тот же вопрос в отношении плоской кривой $x^2 - y^2 + x^3 = 0$. Частные производные имеют вид $\dfrac{\partial F}{\partial x} = 2x + 3x^2 = x(2+3x)$, $\dfrac{\partial F}{\partial y} = -2y$. Обе частные производные обращаются в нуль в двух точках плоскости $(0,0)$ и $(-2/3, 0)$. Из этих двух точек только первая принадлежит рассматриваемой кривой, т. е. является особой. Построив кривую $x^2 - y^2 + x^3 = 0$ в окрестности точки $(0,0)$, мы убедимся в том, что эта точка является точкой самопересечения графика (рис. 15.4). Ясно, что в окрестности этой точки кривую нельзя однозначно спроецировать ни на ось Ox, ни на ось Oy.

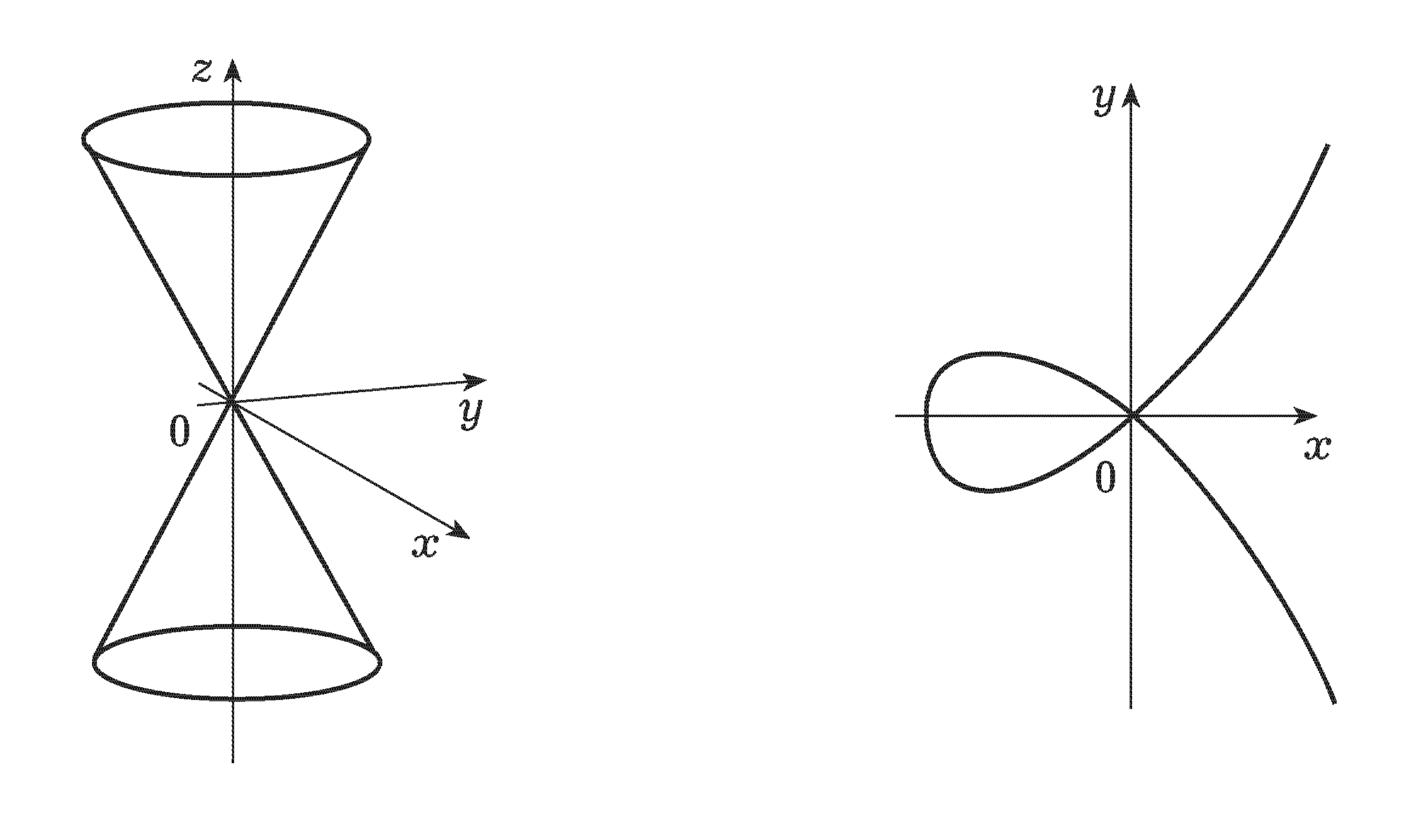


Рис. 15.3

Рис. 15.4

4. Условия, обеспечивающие существование для функции $y = f(x)$ обратной функции. Применим теорему 15.1 для выяснения условий, при выполнении которых функция $y = f(x)$ имеет в некоторой окрестности точки x_0 *обратную функцию* $x = f^{-1}(y)$, определенную в некоторой окрестности точки y_0, где $y_0 = f(x_0)$. Будем рассматривать $y = f(x)$ как функцию, определяемую функциональным уравнением вида $F(x,y) = f(x) - y = 0$.

Тогда вопрос о существовании обратной функции совпадает с вопросом о разрешимости относительно x указанного функционального уравнения. Как следствие теоремы 15.1 и замечания 1 перед доказательством этой теоремы, мы получим следующее утверждение: *если функция $y = f(x)$ имеет отличную от нуля производную в некоторой окрестности точки x_0, то для этой функции в окрестности x_0 существует обратная функ-*

ция $x = f^{-1}(y)$, *определенная и дифференцируемая в некоторой окрестности точки* y_0, *где* $y_0 = f(x_0)$. *Производная указанной обратной функции в точке* y_0 *в силу второй из формул* (15.11) *равна* $\dfrac{1}{f'(x_0)}$.

§ 3. Неявные функции, определяемые системой функциональных уравнений

1. Теорема о разрешимости системы функциональных уравнений. В предыдущем параграфе мы рассматривали вопрос о существовании и дифференцируемости неявной функции, определяемой посредством *одного* функционального уравнения. В этом параграфе мы рассмотрим аналогичный вопрос *для совокупности* m (m — любое натуральное число) *неявных функций, определяемых посредством системы функциональных уравнений.*

Итак, предположим, что m функций

$$\begin{aligned} u_1 &= \varphi_1(x_1, x_2, \ldots, x_n), \\ u_2 &= \varphi_2(x_1, x_2, \ldots, x_n), \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots \\ u_m &= \varphi_m(x_1, x_2, \ldots, x_n) \end{aligned} \tag{15.13}$$

ищутся как решение системы m функциональных уравнений

$$\begin{aligned} F_1(u_1, u_2, \ldots, u_m, x_1, x_2, \ldots, x_n) &= 0, \\ F_2(u_1, u_2, \ldots, u_m, x_1, x_2, \ldots, x_n) &= 0, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ F_m(u_1, u_2, \ldots, u_m, x_1, x_2, \ldots, x_n) &= 0. \end{aligned} \tag{15.14}$$

Изучим вопрос о разрешимости системы функциональных уравнений (15.14) относительно $u_1, u_2, \ldots, u_m$. Под термином «решение системы (15.14)» мы в дальнейшем будем понимать совокупность m функций (15.13) таких, что при подстановке этих функций в систему (15.14) все уравнения этой системы обращаются в тождества. Это решение мы будем называть непрерывным и дифференцируемым в некоторой области D изменения переменных $x_1, x_2, \ldots, x_n$, если каждая из функций (15.13) непрерывна и дифференцируема в области D. Договоримся обозначать символом R пространство $(m+n)$ переменных $u_1, u_2, \ldots, u_m, x_1, x_2, \ldots, x_n$, а символом R' пространство n переменных $x_1, x_2, \ldots, x_n$.

Рассмотрим m функций $F_1, F_2, \ldots, F_m$, стоящих в левых частях системы (15.14), и составим из частных производных этих

функций следующий определитель:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial u_1} & \frac{\partial F_1}{\partial u_2} & \ldots & \frac{\partial F_1}{\partial u_m} \\ \frac{\partial F_2}{\partial u_1} & \frac{\partial F_2}{\partial u_2} & \ldots & \frac{\partial F_2}{\partial u_m} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \frac{\partial F_m}{\partial u_1} & \frac{\partial F_m}{\partial u_2} & \ldots & \frac{\partial F_m}{\partial u_m} \end{vmatrix}. \tag{15.15}$$

Будем называть определитель вида (15.15) *определителем Якоби*[1]) (или кратко *якобианом*) функций $F_1, F_2, \ldots, F_m$ по переменным $u_1, u_2, \ldots, u_m$ и кратко обозначать символом

$$\frac{D(F_1, F_2, \ldots, F_m)}{D(u_1, u_2, \ldots, u_m)}.$$

Имеет место следующее замечательное утверждение.

Теорема 15.2 (обобщение теоремы 15.1). *Пусть m функций*

$$\begin{gathered} F_1(u_1, u_2, \ldots, u_m, x_1, \ldots, x_n), \\ F_2(u_1, u_2, \ldots, u_m, x_1, \ldots, x_n), \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \\ F_m(u_1, u_2, \ldots, u_m, x_1, \ldots, x_n) \end{gathered} \tag{15.16}$$

дифференцируемы в некоторой окрестности точки $M_0(\overset{\circ}{u}_1, \overset{\circ}{u}_2, \ldots, \overset{\circ}{u}_m, \overset{\circ}{x}_1, \ldots, \overset{\circ}{x}_n)$ пространства R, причем частные производные этих функций по переменным u_1, u_2, ..., u_m непрерывны в точке M_0. Тогда, если в точке M_0 все функции (15.16) *обращаются в нуль, а якобиан $\frac{D(F_1, F_2, \ldots, F_m)}{D(u_1, u_2, \ldots, u_m)}$ отличен от нуля, то для достаточно малых положительных чисел $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \ldots, \varepsilon_m$ найдется такая окрестность точки $M_0'(\overset{\circ}{x}_1, \ldots, \overset{\circ}{x}_n)$ пространства R', что в пределах этой окрестности существуют единственные m функций* (15.13), *которые удовлетворяют условиям $|u_1 - \overset{\circ}{u}_1| < \varepsilon_1$, $|u_2 - \overset{\circ}{u}_2| < \varepsilon_2$, ..., $|u_m - \overset{\circ}{u}_m| < \varepsilon_m$ и являются решением системы уравнений* (15.14), *причем это решение непрерывно и дифференцируемо в указанной окрестности точки M_0'.*

[1]) Карл Густав Яков Якоби — немецкий математик (1804–1851).

Замечание. При $m = 1$ теорема 15.2 переходит в доказанную выше [1] теорему 15.1, ибо в этом случае якобиан (15.15) обращается в частную производную $\partial F_1/\partial u_1$.

Доказательство теоремы 15.2 проведем методом математической индукции. При $m = 1$ теорема уже доказана. Поэтому достаточно, предположив теорему 15.2 справедливой для системы $m-1$ функциональных уравнений, доказать справедливость этой теоремы и для системы m функциональных уравнений. Поскольку, по предположению, якобиан

$$\Delta = \frac{D(F_1, F_2, \ldots, F_m)}{D(u_1, u_2, \ldots, u_m)} = \begin{vmatrix} \boxed{\begin{matrix} \dfrac{\partial F_1}{\partial u_1} & \ldots & \dfrac{\partial F_1}{\partial u_{m-1}} \\ \ldots & \ldots & \ldots \\ \dfrac{\partial F_{m-1}}{\partial u_1} & \ldots & \dfrac{\partial F_{m-1}}{\partial u_{m-1}} \end{matrix}} & \begin{matrix} \dfrac{\partial F_1}{\partial u_m} \\ \ldots \\ \dfrac{\partial F_{m-1}}{\partial u_m} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \dfrac{\partial F_m}{\partial u_1} & \ldots & \dfrac{\partial F_m}{\partial u_{m-1}} \end{matrix} & \dfrac{\partial F_m}{\partial u_m} \end{vmatrix} \tag{15.17}$$

отличен от нуля в точке M_0, то *хотя бы один из миноров* $(m-1)$-го порядка [2] этого якобиана отличен от нуля в точке M_0. Не ограничивая общности, будем считать, что в точке M_0 отличен от нуля обведенный рамкой минор, стоящий в левом верхнем углу. Тогда, в силу предположения индукции, первые $m-1$ уравнений системы (15.14) разрешимы относительно $u_1, u_2, \ldots, u_{m-1}$. Точнее, для достаточно малых положительных чисел $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \ldots, \varepsilon_{m-1}$ найдется такая окрестность точки $M_0''(\overset{\circ}{u}_m, \overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_n)$ пространства R'' переменных $(u_m, x_1, x_2, \ldots, x_n)$, что в пределах этой окрестности определены $m-1$ функций

$$\begin{gathered} u_1 = \Phi_1(u_m, x_1, x_2, \ldots, x_n), \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ u_{m-1} = \Phi_{m-1}(u_m, x_1, x_2, \ldots, x_n), \end{gathered} \tag{15.18}$$

которые удовлетворяют условиям $|u_1 - \overset{\circ}{u}_1| < \varepsilon_1, \ldots, |u_{m-1} - \overset{\circ}{u}_{m-1}| < \varepsilon_{m-1}$ и являются при наличии этих условий единственным непрерывным и дифференцируемым решением системы первых $m-1$ уравнений (15.14).

Подставим найденные функции (15.18) в левую часть послед-

[1]) При этом следует учесть замечание 2 к теореме 15.1.

[2]) Напомним, что *минором* $(m-1)$-го порядка данного определителя m-го порядка называется определитель $(m-1)$-го порядка, полученный из данного определителя m-го порядка вычеркиванием одной строки и одного столбца.

него из уравнений (15.14). При этом левая часть последнего из уравнений (15.14) превращается в функцию, зависящую только от $u_m, x_1, \ldots, x_n$

$$F_m(u_1, \ldots, u_{m-1}, u_m, x_1, \ldots, x_n) = F_m[\Phi_1(u_m, x_1, \ldots, x_n) \ldots, \\ \Phi_{m-1}(u_m, x_1, \ldots, x_n), u_m, x_1, \ldots, x_n] = \Psi(u_m, x_1, \ldots, x_n) \tag{15.19}$$

(эту функцию мы обозначили буквой Ψ). Таким образом, последнее из уравнений системы (15.14) приводит нас к уравнению

$$\Psi(u_m, x_1, \ldots, x_n) = 0. \tag{15.20}$$

В силу равенства (15.19) $\Psi(u_m, x_1, \ldots, x_n)$ можно рассматривать как сложную функцию своих аргументов. Тогда, применяя теорему о дифференцируемости сложной функции, мы можем утверждать, что функция $\Psi(u_m, x_1, \ldots, x_n)$ *дифференцируема в некоторой окрестности точки* $M_1''(\overset{\circ}{u}_m, \overset{\circ}{x}_1, \ldots, \overset{\circ}{x}_n)$ *пространства* R''. Равенство (15.19) и последнее из уравнений (15.14) позволяет утверждать, что $\Psi(\overset{\circ}{u}_m, \overset{\circ}{x}_1, \ldots, \overset{\circ}{x}_n) = 0$. Поэтому, чтобы доказать, что к уравнению (15.20) применима теорема 15.1 и это уравнение разрешимо относительно u_m, достаточно установить, что частная производная $\dfrac{\partial\Psi}{\partial u_m}$ непрерывна и отлична от нуля в точке M_0''. Чтобы сделать это, вычислим указанную частную производную. Подставим в первые $m-1$ уравнений системы (15.14) функции (15.18), являющиеся решением этих уравнений, и продифференцируем полученные при этом тождества по u_m. Получим

$$\frac{\partial F_1}{\partial u_1}\frac{\partial \Phi_1}{\partial u_m} + \ldots + \frac{\partial F_1}{\partial u_{m-1}}\frac{\partial \Phi_{m-1}}{\partial u_m} + \frac{\partial F_1}{\partial u_m} = 0, \tag{15.21^1}$$

. . . .

$$\frac{\partial F_{m-1}}{\partial u_1}\frac{\partial \Phi_1}{\partial u_m} + \ldots + \frac{\partial F_{m-1}}{\partial u_{m-1}}\frac{\partial \Phi_{m-1}}{\partial u_m} + \frac{\partial F_{m-1}}{\partial u_m} = \frac{\partial \Psi}{\partial u_m}. \tag{15.21^{m-1}}$$

Далее продифференцируем по u_m равенство (15.19). Получим

$$\frac{\partial F_m}{\partial u_1}\frac{\partial \Phi}{\partial u_m} + \ldots + \frac{\partial F_m}{\partial u_{m-1}}\frac{\partial \Phi_{m-1}}{\partial u_m} + \frac{\partial F_m}{\partial u_m} = \frac{\partial \Psi}{\partial u_m}. \tag{15.21^m}$$

Умножим теперь равенства (15.21^1)–(15.21^m) на соответствующие алгебраические дополнения $\Delta_1, \Delta_2, \ldots, \Delta_m$ элементов последнего столбца якобиана (15.17) и после этого сложим эти ра-

венства. Получим

$$\sum_{k=1}^{m-1} \frac{\partial \Phi_k}{\partial u_m} \left[\Delta_1 \frac{\partial F_1}{\partial u_k} + \Delta_2 \frac{\partial F_2}{\partial u_k} + \ldots + \Delta_m \frac{\partial F_m}{\partial u_k}\right] + \\ + \left(\Delta_1 \frac{\partial F_1}{\partial u_m} + \Delta_2 \frac{\partial F_2}{\partial u_m} + \ldots + \Delta_m \frac{\partial F_m}{\partial u_m}\right) = \Delta_m \frac{\partial \Psi}{\partial u_m}.$$

Так как сумма произведений элементов данного столбца определителя на соответствующие алгебраические дополнения элементов этого (другого) столбца равна определителю (нулю), то каждая квадратная скобка равна нулю, а круглая скобка равна якобиану (15.17).

Таким образом, мы получим

$$\Delta = \Delta_m \frac{\partial \Psi}{\partial u_m}. \tag{15.22}$$

Здесь символом Δ обозначен якобиан (15.17), а Δ_m — алгебраическое дополнение последнего элемента последнего столбца, которое совпадает с минором, обведенным рамкой и, по предположению, *отличным от нуля* в точке M_0. Поделив равенство (15.22) на Δ_m, окончательно найдем

$$\frac{\partial \Psi}{\partial u_m} = \frac{\Delta}{\Delta_m}. \tag{15.23}$$

Формула (15.23), справедливая в точке M_0'', доказывает непрерывность частной производной $\frac{\partial \Psi}{\partial u_m}$ в точке M_0'' (ибо Δ и Δ_m состоят из частных производных функций (15.16) по $u_1, u_2, \ldots$ $\ldots, u_m$, непрерывных в точке M_0).

Кроме того, из формулы (15.23) вытекает, что $\frac{\partial \Psi}{\partial u_m}$ в точке M_0'' отлична от нуля (ибо якобиан Δ отличен от нуля в точке M_0). Тем самым мы доказали, что к уравнению (15.20) можно применить теорему 15.1.

Согласно этой теореме для достаточно малого положительного числа ε_m найдется такая окрестность точки $M_0'(\overset{\circ}{x}_1, \ldots, \overset{\circ}{x}_n)$ пространства R', что всюду в пределах этой окрестности определена функция

$$u_m = \varphi_m(x_1, x_2, \ldots, x_n), \tag{15.24}$$

которая удовлетворяет условию $|u_m - \overset{\circ}{u}_m| < \varepsilon_m$ и является при наличии этого условия единственным непрерывным и дифференцируемым решением уравнения (15.20). Имея в виду, что функции (15.18) являются решениями первых $m-1$ уравнений (15.14) *при любых* $u_m, x_1, \ldots, x_n$ из окрестности точки M_0'',

и вставляя найденную функцию (15.24) в (15.18), мы получим функции, зависящие только от переменных $x_1, \ldots, x_n$:

$$u_1 = \Phi_1[\varphi_m(x_1, \ldots, x_n), x_1, \ldots, x_n] = \varphi_1(x_1, \ldots, x_n),$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$u_{m-1} = \Phi_{m-1}[\varphi_m(x_1, \ldots, x_n), x_1, \ldots, x_n] = \varphi_{m-1}(x_1, \ldots, x_n).$$

(Эти функции мы обозначили символами $\varphi_1, \ldots, \varphi_{m-1}$.) Теорема о дифференцируемости сложной функции дает право утверждать, что каждая из функций $\varphi_1, \ldots, \varphi_{m-1}$ дифференцируема в окрестности точки $M_0'(\overset{\circ}{x}_1, \ldots, \overset{\circ}{x}_n)$. Таким образом, мы окончательно доказали, что m функций

$$\begin{aligned} u_1 &= \varphi_1(x_1, \ldots, x_n), \\ u_2 &= \varphi_2(x_1, \ldots, x_n), \\ &\ldots\ldots\ldots \\ u_m &= \varphi_m(x_1, \ldots, x_n) \end{aligned} \tag{15.25}$$

удовлетворяют в окрестности точки M_0' условиям $|u_1 - \overset{\circ}{u}_1| < \varepsilon_1, \ldots, |u_m - \overset{\circ}{u}_m| < \varepsilon_m$ и представляют собой при наличии этих условий единственное непрерывное и дифференцируемое в некоторой окрестности точки $M_0'(\overset{\circ}{x}_1, \ldots, \overset{\circ}{x}_n)$ решение системы (15.14).

Остается доказать, что функции (15.25) представляют собой единственное решение системы (15.14), удовлетворяющее условиям $|u_1 - \overset{\circ}{u}_1| < \varepsilon_1, \ldots, |u_m - \overset{\circ}{u}_m| < \varepsilon_m$ (при достаточно малых положительных $\varepsilon_1, \ldots, \varepsilon_m$).

Предположим, что, кроме функций (15.25), существуют еще m функций

$$\begin{aligned} \hat{u}_1 &= \hat{\varphi}_1(x_1, x_2, \ldots, x_n), \\ \hat{u}_2 &= \hat{\varphi}_2(x_1, x_2, \ldots, x_n), \\ &\ldots\ldots\ldots \\ \hat{u}_m &= \hat{\varphi}_m(x_1, x_2, \ldots, x_n), \end{aligned} \tag{15.25'}$$

также являющихся решением системы (15.14) и удовлетворяющих условиям $|\hat{u}_1 - \overset{\circ}{u}_1| < \varepsilon_1, \ldots, |\hat{u}_m - \overset{\circ}{u}_m| < \varepsilon_m$.

Тогда, в силу предположения индукции, первые $(m-1)$ функций (15.25) представляют собой при заданном $u_m = \hat{u}_m$ единственное и дифференцируемое решение системы первых $(m-1)$

уравнений (15.14). Но при заданном u_m единственное решение системы первых $(m-1)$ уравнений (15.14) дается равенствами (15.18). Таким образом, справедливы соотношения

$$\begin{gathered} \hat{u}_1 = \Phi(\hat{u}_m, x_1, \ldots, x_n), \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \hat{u}_{m-1} = \Phi_{m-1}(\hat{u}_m, x_1, \ldots, x_n), \end{gathered} \tag{15.18$'$}$$

в которых $\Phi_1, \ldots, \Phi_{m-1}$ — те же функции, что и (15.18).

В таком случае последнее уравнение (15.14) и соотношения (15.19) позволяют нам утверждать, что $\hat{u}_m$ является единственным решением уравнения (15.20), т. е. $\hat{u}_m = u_m$.

При наличии равенства $\hat{u}_m = u_m$ из соотношений (15.18$'$) и (15.18) сразу же вытекает, что $\hat{u}_1 = u_1, \ldots, \hat{u}_{m-1} = u_{m-1}$.

Теорема 15.2 полностью доказана.

2. Вычисление частных производных функций, неявно определяемых посредством системы функциональных уравнений. В этом пункте мы предположим, что выполнены условия теоремы 15.2, и займемся вычислением частных производных функций (15.25). Подставим функции (15.25) в систему уравнений (15.14), решением которой эти функции являются, и продифференцируем получившиеся тождества по x_l $(l = 1, 2, \ldots, n)$. Получим

$$\begin{gathered} \frac{\partial F_1}{\partial u_1}\frac{\partial u_1}{\partial x_l} + \ldots + \frac{\partial F_1}{\partial u_m}\frac{\partial u_m}{\partial x_l} + \frac{\partial F_1}{\partial x_l} = 0, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \frac{\partial F_m}{\partial u_1}\frac{\partial u_1}{\partial x_l} + \ldots + \frac{\partial F_m}{\partial u_m}\frac{\partial u_m}{\partial x_l} + \frac{\partial F_m}{\partial x_l} = 0. \end{gathered} \tag{15.26}$$

Равенства (15.26) представляют собой линейную систему уравнений относительно m неизвестных $\frac{\partial u_1}{\partial x_l}, \ldots, \frac{\partial u_m}{\partial x_l}$. Определитель этой системы якобиан (15.17) отличен от нуля в окрестности точки M_0. Стало быть, система (15.26) имеет единственное решение, определяемое формулами Крамера:

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_l} = \frac{\dfrac{D(F_1, F_2, \ldots, F_m)}{D(u_1, \ldots, u_{k-1}, x_l, u_{k+1}, \ldots, u_m)}}{\dfrac{D(F_1, F_2, \ldots, F_m)}{D(u_1, u_2, \ldots, u_m)}}.$$

Выражения для частных производных второго и последующих порядков [1]) можно получить посредством дифференцирования этих формул.

[1]) Существование этих частных производных обеспечивается дополнительными ограничениями на функции (15.16).

3. Взаимно однозначное отображение двух множеств m-мерного пространства. Рассмотрим в некоторой окрестности точки $M_0(\overset{\circ}{x}_1, \ldots, \overset{\circ}{x}_m)$ m функций

$$\begin{aligned} u_1 &= \varphi_1(x_1, \ldots, x_m), \\ u_2 &= \varphi_2(x_1, \ldots, x_m), \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots \\ u_m &= \varphi_m(x_1, \ldots, x_m). \end{aligned} \tag{15.27}$$

Рассматриваемые m функций осуществляют отображение указанной окрестности точки M_0 на некоторое множество $\{N\}$ m-мерного пространства переменных $u_1, u_2, \ldots, u_m$. Это отображение называется *взаимно однозначным*, если каждой точке из указанной окрестности точки M_0 соответствует только одна точка множества $\{N\}$, так что при этом каждая точка множества $\{N\}$ соответствует только одной точке указанной окрестности точки M_0.

Из теоремы 15.2 непосредственно вытекает следующее утверждение.

Если функции (15.27) *дифференцируемы в окрестности точки* M_0, *причем все частные производные первого порядка непрерывны в самой точке* M_0, *а якобиан* $\dfrac{D(\varphi_1, \ldots, \varphi_m)}{D(x_1, \ldots, x_m)}$ *отличен от нуля в этой точке, то функции* (15.27) *осуществляют взаимно однозначное отображение некоторой окрестности точки* $M_0(\overset{\circ}{x}_1, \ldots, \overset{\circ}{x}_m)$ *на некоторую окрестность точки* $N_0(\overset{\circ}{u}_1, \ldots, \overset{\circ}{u}_m)$, *где* $\overset{\circ}{u}_i = \varphi_i(\overset{\circ}{x}_1, \ldots, \overset{\circ}{x}_m)$ $(i = 1, 2, \ldots, m)$.

В самом деле, соотношения (15.27) можно рассматривать как систему функциональных уравнений относительно $x_1, x_2, \ldots, x_m$, для которой выполнены условия теоремы 15.2. Но тогда эта система всюду в некоторой окрестности точки $N_0(\overset{\circ}{u}_1, \ldots, \overset{\circ}{u}_m)$ имеет единственное решение:

$$\begin{aligned} x_1 &= \psi_1(u_1, \ldots, u_m), \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots \\ x_m &= \psi_m(u_1, \ldots, u_m). \end{aligned} \tag{15.27$'$}$$

Очевидно, что функции (15.27$'$) осуществляют обратное отображение.

Заметим, что в условиях сформулированного утверждения как функции (15.27), осуществляющие прямое отображение, так и функции (15.27$'$), осуществляющие обратное отображение, являются *непрерывными*. Взаимно однозначное отображение, обладающее таким свойством, называется *гомеоморфным*.

§ 4. Зависимость функций

1. Понятие зависимости функций. Достаточное условие независимости. Пусть m функций от одних и тех же n переменных

$$\begin{aligned} u_1 &= \varphi_1(x_1, x_2, \ldots, x_n), \\ u_2 &= \varphi_2(x_1, x_2, \ldots, x_n), \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots \\ u_m &= \varphi_m(x_1, x_2, \ldots, x_n) \end{aligned} \tag{15.28}$$

определены и дифференцируемы в некоторой открытой n-мерной области [1] D.

Будем говорить, что *одна из этих функций*, например u_k, *зависит в области* D *от остальных функций, если сразу для всех точек* $(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ *области* D

$$u_k = \Phi(u_1, \ldots, u_{k-1}, u_{k+1}, \ldots, u_m), \tag{15.29}$$

где Φ *— некоторая функция, определенная и дифференцируемая в соответствующей области изменения своих аргументов.* Функции $u_1, u_2, \ldots, u_m$ будем называть *зависимыми в области* D, если одна из этих функций (все равно какая) зависит в области D от остальных.

Если же не существует дифференцируемой функции Φ такой, что сразу для всех точек области D справедливо тождество вида (15.29), то мы будем называть функции $u_1, u_2, \ldots, u_m$ независимыми в области D.

П р и м е р ы. 1. Легко убедиться в том, что три функции четырех переменных

$$u_1 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2,$$

$$u_2 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4,$$

$$u_3 = 2x_1x_2 + 2x_1x_3 + 2x_1x_4 + 2x_2x_3 + 2x_2x_4 + 2x_3x_4$$

зависимы в любой области D четырехмерного пространства, ибо для всех точек (x_1, x_2, x_3, x_4) этой области

$$u_1 = u_2^2 - u_3.$$

2. Покажем теперь, что две функции двух переменных $u_1 = x+y$ и $u_2 = x-y$ независимы в любой области D плоскости xy, содержащей начало координат. Ясно, что функция u_1 сохраняет постоянное значение нуль на прямой $x + y = 0$, проходящей через начало координат (рис. 15.5). Но на этой прямой функция u_2 имеет переменное значение $u_2 = 2x$. Поэтому на том участке этой прямой, который лежит внутри D, u_2 заведомо не зависит от u_1. Совершенно аналогично доказывается, что на лежащем внутри области D участке прямой $x - y = 0$ $u_2 = 0$, $u_1 = 2x$ и, стало быть, u_1 не зависит от u_2.

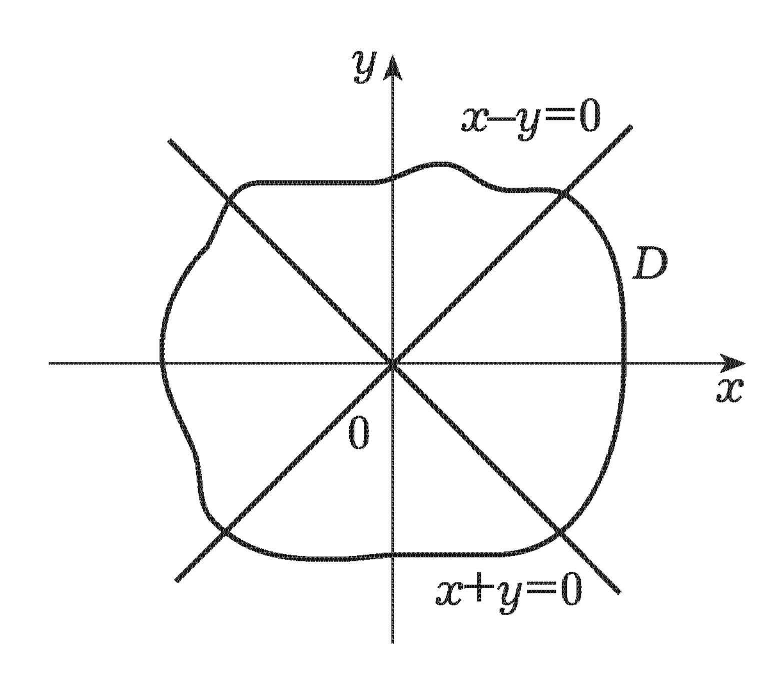


Рис. 15.5

[1] В частности, в качестве области D можно взять некоторую окрестность фиксированной точки M_0 n-мерного пространства.

Замечание. В курсе линейной алгебры вводится понятие *линейной зависимости* функций: m функций $u_1, u_2, \ldots, u_m$ называются линейно зависимыми в области D, если для всех точек области D одна из этих функций выражается в виде линейной функции от остальных. Ясно, что линейная зависимость функций является частным случаем зависимости этих функций, ибо, если функции $u_1, u_2, \ldots, u_m$ линейно зависимы в области D, то они зависимы в этой области, но существуют функции, зависимые в области D, но не являющиеся в D линейно зависимыми (например, функции, выписанные в примере 1).

Теорема 15.3 (достаточное условие независимости функций). *Пусть m функций от $n \geqslant m$ переменных*

$$u_1 = \varphi_1(x_1, \ldots, x_m, x_{m+1}, \ldots, x_n),$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$u_m = \varphi_m(x_1, \ldots, x_m, x_{m+1}, \ldots, x_n)$$

определены и дифференцируемы в окрестности точки $M_0(\overset{\circ}{x}_1, \ldots$ $\ldots, \overset{\circ}{x}_m, \overset{\circ}{x}_{m+1}, \ldots, \overset{\circ}{x}_n)$. Тогда если якобиан из этих функций по каким-либо m переменным отличен от нуля в точке M_0, то эти функции независимы в некоторой окрестности точки M_0.

Доказательство. Не ограничивая общности, будем считать, что в точке M_0 отличен от нуля якобиан

$$\frac{D(u_1, u_2, \ldots, u_m)}{D(x_1, x_2, \ldots, x_m)}. \tag{15.30}$$

Докажем теорему от противного. Предположим, что функции $u_1, u_2, \ldots, u_m$ зависимы в некоторой окрестности точки M_0, т. е. одна из этих функций, например u_k, для всех точек этой окрестности выражается в виде

$$u_k = \Phi(u_1, \ldots, u_{k-1}, u_{k+1}, \ldots, u_m),$$

где Φ — некоторая дифференцируемая функция. Пользуясь правилом дифференцирования сложной функции, вычислим производную функции u_k по любой из переменных x_l $(l = 1, 2, \ldots, m)$. Будем иметь

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_l} = \frac{\partial \Phi}{\partial u_1}\frac{\partial u_1}{\partial x_l} + \ldots + \frac{\partial \Phi}{\partial u_{k-1}}\frac{\partial u_{k-1}}{\partial x_l} + \\ + \frac{\partial \Phi}{\partial u_{k+1}}\frac{\partial u_{k+1}}{\partial x_l} + \ldots + \frac{\partial \Phi}{\partial u_m}\frac{\partial u_m}{\partial x_l} \quad (l = 1, 2, \ldots, m). \tag{15.31}$$

Из формулы (15.31), если их взять для каждого значения $l =$ $= 1, 2, \ldots, m$ в точке M_0, следует, что k-я строка якобиана (15.30) представляет собой линейную комбинацию остальных строк с коэффициентами, соответственно равными $\dfrac{\partial \Phi}{\partial u_1}, \dfrac{\partial \Phi}{\partial u_2}, \ldots$

$\ldots, \dfrac{\partial\Phi}{\partial u_{k-1}}, \dfrac{\partial\Phi}{\partial u_{k+1}}, \ldots, \dfrac{\partial\Phi}{\partial u_m}$. Но в этом случае якобиан (15.30) равен нулю в точке M_0, что противоречит условию теоремы.

П р и м е р. Уже рассмотренные выше две функции $u_1 = x + y$ и $u_2 = x - y$ независимы в окрестности любой точки $M(x, y)$, ибо якобиан $\dfrac{D(u_1, u_2)}{D(x, y)} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} = -2 \neq 0$ всюду.

2. Функциональные матрицы и их приложения. Снова рассмотрим m функций от n переменных (15.28):

$$\begin{aligned} u_1 &= \varphi_1(x_1, x_2, \ldots, x_n), \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots \\ u_m &= \varphi_m(x_1, x_2, \ldots, x_n). \end{aligned} \tag{15.28}$$

На этот раз предположим, что функции (15.28) *определены и дифференцируемые в некоторой окрестности точки* $M_0(\overset{\circ}{x}_1, \ldots, \overset{\circ}{x}_n)$, *причем все частные производные первого порядка этих функций непрерывны в самой точке* M_0.

Составим из частных производных функций (15.28) следующую функциональную матрицу:

$$\begin{Vmatrix} \dfrac{\partial\varphi_1}{\partial x_1} & \dfrac{\partial\varphi_1}{\partial x_2} & \ldots & \dfrac{\partial\varphi_1}{\partial x_n} \\ \dfrac{\partial\varphi_2}{\partial x_1} & \dfrac{\partial\varphi_2}{\partial x_2} & \ldots & \dfrac{\partial\varphi_2}{\partial x_n} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \dfrac{\partial\varphi_m}{\partial x_1} & \dfrac{\partial\varphi_m}{\partial x_2} & \ldots & \dfrac{\partial\varphi_m}{\partial x_n} \end{Vmatrix}, \tag{15.32}$$

содержащую m строк и n столбцов.

Имеет место следующее утверждение.

Теорема 15.4. *Пусть у функциональной матрицы* (15.32) : 1) *некоторый минор r-го порядка*[1]) *отличен от нуля в точке* $M_0(\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_n)$, 2) *все миноры $(r+1)$-го порядка равны нулю в некоторой окрестности точки* M_0[2]). *Тогда r функций, представленных в указанном миноре r-го порядка, независимы в окрестности точки M_0, каждая из остальных функций зависит в этой окрестности от указанных r функций.*

Д о к а з а т е л ь с т в о. Не ограничивая общности, будем считать, что в точке M_0 отличен от нуля минор, стоящий

[1]) Напомним, что *минором* r-го порядка данной матрицы называется определитель, составленный из элементов, стоящих на пересечении каких-либо r столбцов и r строк матрицы.

[2]) В случае, если $r = \min(m, n)$, требование 2) следует опустить.

в левом верхнем углу матрицы (15.32), т. е. отличен от нуля определитель

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial\varphi_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial\varphi_1}{\partial x_r} \\ \cdot & \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot & \cdot \\ \frac{\partial\varphi_r}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial\varphi_r}{\partial x_r} \end{vmatrix}. \tag{15.33}$$

Тогда независимость в окрестности точки M_0 функций $u_1, u_2, \ldots, u_r$ сразу вытекает из теоремы 15.3. Остается доказать, что любая из функций $u_{r+1}, \ldots, u_m$ [1]) зависит в окрестности M_0 от $u_1, u_2, \ldots, u_r$. Докажем, например, что u_{r+1} *зависит в окрестности точки* M_0 от $u_1, u_2, \ldots, u_r$. Сосредоточим свое внимание на первых r функциях (15.28). Если обозначить через $\overset{\circ}{u}_1, \ldots, \overset{\circ}{u}_r$ числа вида $\overset{\circ}{u}_1 = \varphi_1(\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_n)$, ..., $\overset{\circ}{u}_r = \varphi_r(\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \ldots, \overset{\circ}{x}_n)$, то всюду в некоторой окрестности точки $N_0(\overset{\circ}{u}_1, \ldots, \overset{\circ}{u}_r, \overset{\circ}{x}_1, \ldots, \overset{\circ}{x}_n)$ $(n+r)$-мерного пространства первые r функций (15.28) представляют собой единственное и дифференцируемое решение следующей системы уравнений [2]):

$$\begin{aligned} F_1(u_1, \ldots, u_r, x_1, \ldots, x_n) &\equiv \varphi_1(x_1, \ldots, x_n) - u_1 = 0, \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ F_r(u_1, \ldots, u_r, x_1, \ldots, x_n) &\equiv \varphi_r(x_1, \ldots, x_n) - u_r = 0. \end{aligned} \tag{15.34}$$

С другой стороны, поскольку якобиан

$$\frac{D(F_1, \ldots, F_r)}{D(x_1, \ldots, x_r)},$$

совпадающий с минором (15.33), отличен от нуля в точке N_0, то систему (15.34) можно в окрестности этой точки *однозначно разрешить относительно* $x_1, \ldots, x_r$. Иными словами, всюду в достаточно малой окрестности точки N_0 система (15.34) имеет единственное и дифференцируемое решение

$$\begin{aligned} x_1 &= \psi_1(u_1, \ldots, u_r, x_{r+1}, \ldots, x_n), \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ x_r &= \psi_r(u_1, \ldots, u_r, x_{r+1}, \ldots, x_n). \end{aligned} \tag{15.35}$$

[1]) Конечно, при этом предполагается, что $m > r$.

[2]) В самом деле, в указанном точке N_0 все функции $F_1, \ldots, F_r$ обращаются в нуль, а якобиан $\frac{D(F_1, \ldots, F_r)}{D(u_1, \ldots, u_r)} = (-1)^r \neq 0$, так что выполнены условия теоремы 15.2.

Подчеркнем, что равенства (15.35) и первые r равенств (15.28) полностью эквивалентны в окрестности точки N_0. В частности, если подставить x_1, x_2, ..., x_r, определяемые уравнениями (15.35), в первые r равенств (15.28), то указанные равенства обратятся в тождества относительно x_{r+1}, ..., x_n, u_1, ..., u_r. Дифференцируя эти тождества по переменной x_l $(l = r+1, \ldots \ldots, n)$ и замечая, что u_1, ..., u_r не зависят от x_{r+1}, ..., x_n, будем иметь

$$\frac{\partial\varphi_1}{\partial x_1}\frac{\partial\psi_1}{\partial x_l} + \ldots + \frac{\partial\varphi_1}{\partial x_r}\frac{\partial\psi_r}{\partial x_l} + \frac{\partial\varphi_1}{\partial x_l} = 0, \qquad (15.36^1)$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

$$\frac{\partial\varphi_r}{\partial x_1}\frac{\partial\psi_1}{\partial x_l} + \ldots + \frac{\partial\varphi_r}{\partial x_r}\frac{\partial\psi_r}{\partial x_l} + \frac{\partial\varphi_r}{\partial x_l} = 0. \qquad (15.36^r)$$

Заметим, что равенства (15.36^1)–(15.36^r) справедливы для всех значений переменных $x_1, \ldots, x_r, x_{r+1}, \ldots, x_n$ из некоторой окрестности точки M_0.

Для того чтобы убедиться в том, что функция u_{r+1} зависит в некоторой окрестности точки M_0 от $u_1, \ldots, u_r$, подставим значения $x_1, \ldots, x_r$, определяемые уравнениями (15.35), в $(r+1)$-е равенство (15.28). При этом u_{r+1} превращается в функцию аргументов $u_1, \ldots, u_r, x_{r+1}, \ldots, x_n$, ибо $u_{r+1} = \varphi_{r+1}(x_1, \ldots, x_r, x_{r+1}, \ldots, x_n) = \varphi_{r+1}[\psi_1(u_1, \ldots, u_r, x_{r+1}, \ldots, x_n), \ldots, \psi_r(u_1, \ldots \ldots, u_r, x_{r+1}, \ldots, x_n), x_{r+1}, \ldots, x_n] = \Phi(u_1, \ldots, u_r, x_{r+1}, \ldots, x_n)$ (эту функцию мы обозначили буквой Φ). Остается доказать, что для всех значений переменных $x_1, \ldots, x_r, x_{r+1}, \ldots, x_n$, лежащих в достаточно малой окрестности точки M_0, функция Φ *не зависит от* $x_{r+1}, \ldots, x_n$. Для этого достаточно доказать, что для всех $x_1, \ldots, x_n$ из достаточно малой окрестности точки M_0 справедливы равенства

$$\frac{\partial\Phi}{\partial x_l} = 0 \quad (l = r+1, \ldots, n). \qquad (15.37)$$

Продифференцируем функцию Φ по переменной x_l $(l = r+1, \ldots \ldots, n)$ как сложную функцию. При этом получим

$$\frac{\partial\varphi_{r+1}}{\partial x_1}\frac{\partial\psi_1}{\partial x_l} + \ldots + \frac{\partial\varphi_{r+1}}{\partial x_r}\frac{\partial\psi_r}{\partial x_l} + \frac{\partial\varphi_{r+1}}{\partial x_l} = \frac{\partial\Phi}{\partial x_l}. \qquad (15.36^{r+1})$$

Рассмотрим теперь следующий минор $(r+1)$-го порядка матрицы (15.32):

$$\Delta = \begin{vmatrix} \dfrac{\partial\varphi_1}{\partial x_1} & \ldots & \dfrac{\partial\varphi_1}{\partial x_r} & \dfrac{\partial\varphi_1}{\partial x_l} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \dfrac{\partial\varphi_r}{\partial x_1} & \ldots & \dfrac{\partial\varphi_r}{\partial x_r} & \dfrac{\partial\varphi_r}{\partial x_l} \\ \dfrac{\partial\varphi_{r+1}}{\partial x_1} & \ldots & \dfrac{\partial\varphi_{r+1}}{\partial x_r} & \dfrac{\partial\varphi_{r+1}}{\partial x_l} \end{vmatrix}. \qquad (15.38)$$

По условию теоремы этот минор *равен нулю всюду в окрестности точки* M_0. Умножим равенства (15.36^1)–(15.36^{r+1}) на соответствующие алгебраические дополнения $\Delta_1, \ldots, \Delta_r, \Delta_{r+1}$ элементов последнего столбца минора (15.38) и после этого сложим все эти равенства. В силу теоремы о том, что сумма произведений элементов данного столбца на соответствующие алгебраические дополнения элементов этого (другого) столбца равна определителю (нулю), получим [1])

$$\Delta = \frac{\partial \Phi}{\partial x_l} \Delta_{r+1}. \tag{15.39}$$

В равенстве (15.39) символ Δ обозначает минор (15.38), равный нулю всюду в окрестности точки M_0, а алгебраическое дополнение Δ_{r+1} совпадает с минором (15.33), отличным от нуля в точке M_0, а стало быть, и в некоторой окрестности этой точки [2]). Из равенства (15.39) заключаем, что всюду в некоторой окрестности точки M_0 справедливы равенства (15.37). Теорема доказана.

П р и м е р. Вернемся к исследованию зависимости функций

$$u_1 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2,$$
$$u_2 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4,$$
$$u_3 = 2x_1x_2 + 2x_1x_3 + 2x_1x_4 + 2x_2x_3 + 2x_2x_4 + 2x_3x_4.$$

Функциональная матрица (15.32) имеет вид

$$\left\| \begin{matrix} 2x_1 & 2x_2 & 2x_3 & 2x_4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2(x_2+x_3+x_4) & 2(x_1+x_3+x_4) & 2(x_1+x_2+x_4) & 2(x_1+x_2+x_3) \end{matrix} \right\|.$$

Легко убедиться в том, что все определители 3-го порядка тождественно равны нулю, причем в любой точке пространства (x_1, x_2, x_3, x_4), у которой не все четыре координаты x_1, x_2, x_3, x_4 совпадают, хотя бы один из определителей второго порядка

$$\begin{vmatrix} 2x_1 & 2x_2 \\ 1 & 1 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} 2x_1 & 2x_3 \\ 1 & 1 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} 2x_1 & 2x_4 \\ 1 & 1 \end{vmatrix}$$

отличен от нуля. Стало быть, в окрестности любой указанной точки u_1 и u_2 независимы, а u_3 зависит от u_1 и u_2.

---

[1]) При этом мы повторяем рассуждения, подробно описанные на с. 584.

[2]) Поскольку все частные производные, входящие в минор (15.33), непрерывны в точке M_0, то и сам минор (15.33) непрерывен в точке M_0. Но тогда по теореме об устойчивости знака непрерывной функции этот минор отличен от нуля не только в самой точке M_0, но и в некоторой ее окрестности.

§ 5. Условный экстремум

1. Понятие условного экстремума. В § 6 гл. 14 мы занимались отысканием локальных экстремумов функции, аргументы которой не связаны никакими дополнительными условиями. Вместе с тем в математике и в ее приложениях часто встречается задача *об отыскании экстремумов функции, аргументы которой удовлетворяют дополнительным условиям связи.* Экстремумы такого рода мы будем называть *условными*, чтобы отличить их от (безусловных) экстремумов, изученных в § 6 гл. 14.

Приведем пример задачи об отыскании условного экстремума. Пусть требуется найти экстремум функции $u = x^2 + y^2$ при условии, что аргументы этой функции удовлетворяют условию связи $x + y - 1 = 0$. Таким образом, экстремумы функции $u = x^2 + y^2$ ищутся *не на всей плоскости* xy, *а лишь на прямой* $x + y - 1 = 0$. Для решения поставленной задачи подставим в уравнение функции $u = x^2 + y^2$ значение y, определяемое из условия связи $x + y - 1 = 0$. Таким путем мы сведем поставленную задачу к задаче об отыскании безусловного экстремума функции $u = 2x^2 - 2x + 1$.

Последний экстремум находится без труда: поскольку $u' = 4(x - 1/2)$, $u^{(2)} = 4$, то функция $u = 2x^2 - 2x + 1$ имеет минимум $u = 1/2$ при $x = 1/2$. Таким образом, функция $u = x^2+y^2$ с условием связи $x+y-1 = 0$ имеет условный минимум $u = 1/2$ в точке $(1/2, 1/2)$. Отметим, что безусловный минимум функции $u = x^2 + y^2$ достигается в точке $(0, 0)$ и равен $u = 0$. Впрочем, даже из наглядных соображений (рис. 15.6) очевидно, что минимум функции $u = x^2 + y^2$ (графиком которой служит параболоид вращения) на всей плоскости xy не совпадает с ее минимумом на прямой $x + y - 1 = 0$.

Переходим к общей постановке задачи об отыскании условного экстремума. Пусть требуется найти экстремум функции $m+n$ переменных

$$u = f(x_1, \ldots, x_n, y_1, \ldots, y_m) \tag{15.40}$$

при наличии m условий связи

$$\begin{aligned} F_1(x_1, \ldots, x_n, y_1, \ldots, y_m) &= 0, \\ F_2(x_1, \ldots, x_n, y_1, \ldots, y_m) &= 0, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots& \\ F_m(x_1, \ldots, x_n, y_1, \ldots, y_m) &= 0. \end{aligned} \tag{15.41}$$

Прежде всего уточним само понятие условного экстремума функции (15.40) при наличии связей (15.41). Будем говорить,

что функция (15.40) *при наличии связей* (15.41) *имеет условный максимум* (*минимум*) *в точке* $M_0(\overset{\circ}{x}_1, \ldots, \overset{\circ}{x}_n \overset{\circ}{y}_1, \ldots, \overset{\circ}{y}_m)$, *координаты которой удовлетворяют условиям связи* (15.41), *если найдется такая окрестность точки* M_0, *в пределах которой значение функции* (15.40) *в точке* M_0 *является наибольшим* (*наименьшим*) *среди ее значений во всех точках, координаты которых удовлетворяют условиям связи* (15.41).

Для нахождения условного экстремума функции (15.40) при наличии связей (15.41) предположим, что функции, стоящие в левых частях равенств (15.41), дифференцируемы в некоторой окрестности рассматриваемой точки M_0, причем в самой точке M_0 частные производные указанных функций по $y_1, \ldots, y_m$ непрерывны, а якобиан

$$\frac{D(F_1, \ldots, F_m)}{D(y_1, \ldots, y_m)} \tag{15.42}$$

отличен от нуля.

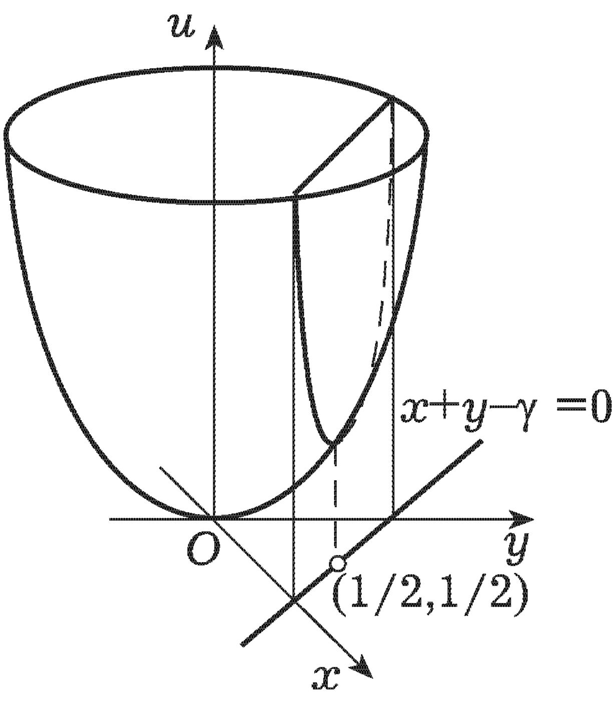


Рис. 15.6

В таком случае в силу теоремы 15.2 для достаточно малых положительных чисел $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \ldots, \varepsilon_m$ найдется такая окрестность точки $M'_0(\overset{\circ}{x}_1, \ldots, \overset{\circ}{x}_n)$ пространства переменных $(x_1, \ldots, x_n)$, что всюду в пределах этой окрестности определены m функций

$$\begin{aligned} y_1 &= \varphi_1(x_1, \ldots, x_n), \\ y_2 &= \varphi_2(x_1, \ldots, x_n), \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots \\ y_m &= \varphi_m(x_1, \ldots, x_n), \end{aligned} \tag{15.43}$$

удовлетворяющих условиям $|y_1 - \overset{\circ}{y}_1| < \varepsilon_1, \ \ldots, \ |y_m - \overset{\circ}{y}_m| < \varepsilon_m$ и являющихся при наличии этих условий единственным и дифференцируемым решением системы уравнений (15.41). Подставляя найденные функции (15.43) в (15.40), мы сведем вопрос о существовании условного экстремума в точке M_0 у функции (15.40) при наличии связей (15.41) к вопросу о существовании безусловного экстремума в точке M'_0 у сложной функции аргументов $x_1, \ldots, x_n$

$$u = f[x_1, \ldots, x_n, \varphi_1(x_1, \ldots, x_n), \ldots, \varphi_m(x_1, \ldots, x_n)] = \\ = \Phi(x_1, \ldots, x_n). \tag{15.44}$$

Вопрос о существовании безусловного экстремума функции (15.44) может быть решен методами, указанными в § 6 гл. 14 [1]). Изложенная нами общая схема сведения условного экстремума к безусловному была реализована в рассмотренном выше частном примере. Постараемся теперь, *не прибегая к решению системы* (15.41), установить по крайней мере необходимые условия существования условного экстремума в точке M_0. Итак, пусть функция (15.40) дифференцируема в точке M_0 и имеет в этой точке условный экстремум при наличии связей (15.41) или (что то же самое) функция (15.44) имеет в точке M_0' безусловный экстремум. Согласно установленному в § 6 гл. 14 необходимым условием безусловного экстремума функции $u = \Phi(x_1, \ldots, x_n)$ в точке M_0' является равенство нулю в этой точке дифференциала этой функции

$$du = \frac{\partial \Phi}{\partial x_1}\, dx_1 + \ldots + \frac{\partial \Phi}{\partial x_n}\, dx_n = 0, \tag{15.45}$$

тождественное относительно $dx_1, \ldots, dx_n$. В силу инвариантности формы первого дифференциала и равенства (15.44) формулу (15.45) можно переписать в виде

$$du = \frac{\partial f}{\partial x_1}\, dx_1 + \ldots + \frac{\partial f}{\partial x_n}\, dx_n + \frac{\partial f}{\partial y_1}\, dy_1 + \ldots + \frac{\partial f}{\partial y_m}\, dy_m = 0. \tag{15.46}$$

(В этой формуле все частные производные берутся в точке M_0.) Подчеркнем, однако, что в равенстве (15.46) $dy_1, \ldots, dy_m$ представляют собой дифференциалы функций (15.43), так что равенство (15.46) не является тождеством относительно $dy_1, \ldots, dy_m$. Предположим, что в уравнения связи (15.41) мы подставили функции (15.43), являющиеся решением системы (15.41). При этом уравнения (15.41) обратятся в тождества, и мы получим, дифференцируя эти тождества,

$$\begin{array}{l} \dfrac{\partial F_1}{\partial x_1}\, dx_1 + \ldots + \dfrac{\partial F_1}{\partial x_n}\, dx_n + \dfrac{\partial F_1}{\partial y_1}\, dy_1 + \ldots + \dfrac{\partial F_1}{\partial y_m}\, dy_m = 0, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \dfrac{\partial F_m}{\partial x_1}\, dx_1 + \ldots + \dfrac{\partial F_m}{\partial x_n}\, dx_n + \dfrac{\partial F_m}{\partial y_1}\, dy_1 + \ldots + \dfrac{\partial F_m}{\partial y_m}\, dy_m = 0. \end{array} \tag{15.47}$$

Так как якобиан (15.42), по предположению, отличен от нуля в точке M_0, то из линейной системы (15.47) $dy_1, \ldots, dy_m$ могут быть выражены как линейные функции $dx_1, \ldots, dx_n$. Если найти эти выражения и подставить их в (15.46), то, собирая в по-

[1]) При этом, конечно, придется подчинить функцию (15.40) некоторым условиям.

лученном равенстве члены, содержащие $dx_1, \ldots, dx_n$, мы будем иметь

$$A_1 dx_1 + \ldots + A_n dx_n = 0, \tag{15.48}$$

где через $A_1, \ldots, A_n$ обозначены некоторые рациональные функции частных производных $f, F_1, \ldots, F_m$ в точке M_0. Так как в равенстве (15.48) фигурируют *лишь дифференциалы независимых переменных*, то из этого равенства заключаем, что $A_1 = 0, \ldots, A_n = 0$. Присоединяя к указанным равенствам m условий связи (15.41), мы получим *необходимые условия* существования условного экстремума функции (15.40) при наличии связей (15.41) в виде

$$A_1 = 0, \ldots, A_n = 0, F_1 = 0, \ldots, F_m = 0. \tag{15.49}$$

Равенства (15.49) представляют собой систему $m + n$ уравнений для определения $m + n$ координат точки возможного экстремума.

2. Метод неопределенных множителей Лагранжа. При изложенном выше методе отыскания точек возможного условного экстремума мы нарушили симметрию в отношении переменных $x_1, \ldots, x_n, y_1, \ldots, y_m$. Часть из этих переменных $x_1, \ldots, x_n$ мы рассматривали как независимые, остальные — как функции этих переменных. В ряде случаев это приводит к усложнению выкладок. Лагранжем предложен метод, симметризирующий роль переменных. Изложению этого метода и посвящен настоящий пункт. Умножим равенства (15.47) соответственно на произвольные (и пока еще неопределенные) постоянные множители $\lambda_1, \ldots, \lambda_m$. Полученные после умножения равенства сложим почленно с равенством (15.46). В результате получим следующее равенство:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x_1} dx_1 + \ldots + \frac{\partial \Psi}{\partial x_n} dx_n + \frac{\partial \Psi}{\partial y_1} dy_1 + \ldots + \frac{\partial \Psi}{\partial y_m} dy_m = 0, \tag{15.50}$$

где символом $\Psi(x_1, \ldots, x_n, y_1, \ldots, y_m)$ обозначена следующая функция

$$\Psi = f + \lambda_1 F_1 + \ldots + \lambda_m F_m. \tag{15.51}$$

Эту функцию мы в дальнейшем будем называть *функцией Лагранжа*. Считая, что для функций (15.41) выполнены условия, сформулированные в предыдущем пункте, и что функция (15.40) дифференцируема, выберем множители $\lambda_1, \ldots, \lambda_m$ так, чтобы выполнялись равенства

$$\frac{\partial \Psi}{\partial y_1} = 0, \ldots, \frac{\partial \Psi}{\partial y_m} = 0. \tag{15.52}$$

Это заведомо можно сделать, ибо равенства (15.52) приводят к линейной системе

$$\frac{\partial f}{\partial y_1} + \lambda_1 \frac{\partial F_1}{\partial y_1} + \ldots + \lambda_m \frac{\partial F_m}{\partial y_1} = 0,$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$\frac{\partial f}{\partial y_m} + \lambda_1 \frac{\partial F_1}{\partial y_m} + \ldots + \lambda_m \frac{\partial F_m}{\partial y_m} = 0,$$

определитель которой (якобиан (15.42)) отличен от нуля. В силу равенств (15.52) равенство (15.50) принимает вид

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x_1} dx_1 + \ldots + \frac{\partial \Psi}{\partial x_n} dx_n = 0. \qquad (15.53)$$

Поскольку при сделанных выше предположениях переменные $x_1, \ldots, x_n$ являются *независимыми*, то из равенства (15.53) заключаем, что

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x_1} = 0, \ldots, \frac{\partial \Psi}{\partial x_n} = 0. \qquad (15.54)$$

Присоединяя к уравнениям (15.52) и (15.54) условия связи (15.41), мы получим систему $n + 2m$ уравнений

$$\begin{gathered} \frac{\partial \Psi}{\partial x_1} = 0, \ \ldots, \ \frac{\partial \Psi}{\partial x_n} = 0, \ \ \frac{\partial \Psi}{\partial y_1} = 0, \ \ldots, \ \frac{\partial \Psi}{\partial y_m} = 0, \\ F_1 = 0, \ldots, F_m = 0 \end{gathered} \qquad (15.55)$$

для определения $n + m$ координат точек возможного условного экстремума и m множителей $\lambda_1, \ldots, \lambda_m$. Практически при реализации этого метода поступают следующим образом. Составляют функцию Лагранжа (15.51) и для этой функции *находят точки возможного безусловного экстремума.* Для исключения множителей $\lambda_1, \ldots, \lambda_m$ привлекают условия связи (15.41). Такой путь отыскания точек возможного условного экстремума является законным, ибо он приводит нас как раз к системе $n + 2m$ уравнений (15.55). Пример применения метода множителей Лагранжа будет рассмотрен в п. 4.

3. Достаточные условия. В этом пункте мы рассмотрим один из путей дополнительного исследования точек возможного условного экстремума. Предположим, что в точке M_0 выполнены необходимые условия экстремума (15.55). Кроме того, дополнительно потребуем двукратной дифференцируемости функций (15.40) и (15.41) в окрестности точки M_0 и непрерывности всех частных производных 2-го порядка в самой точке M_0. Из конструкции функции Лагранжа (15.51) очевидно, что *при наличии связей* (15.41) экстремумы функции (15.40) и функции Лаграндж-

жа совпадают [1]). Но тогда из результатов § 6 гл. 14 вытекает, что для получения достаточного условия экстремума в точке M_0 у функции (15.40) при наличии связей (15.41) *следует присоединить к условиям* (15.55) *требование знакоопределенности в этой точке* $d^2\Psi$. При этом в соответствии с результатами § 6 гл. 14 мы можем констатировать наличие в точке M_0 минимума, если при наличии связей (15.41) $d^2\Psi|_{M_0} > 0$, и максимума, если $d^2\Psi|_{M_0} < 0$. Сделаем еще несколько замечаний практического характера. Прежде всего отметим, что *второй дифференциал* $d^2\Psi$ *можно в данной точке* M_0 *возможного экстремума вычислять так, как если бы все переменные* $x_1, \ldots, x_n, y_1, \ldots, y_m$ *были независимыми.* В самом деле, в общем случае второй дифференциал $d^2\Psi$ функции Ψ не обладает свойством инвариантности формы и должен был бы с учетом зависимости $y_1, \ldots, y_m$ от $x_1, \ldots, x_n$ определяться равенством

$$d^2\Psi = \left(dx_1\frac{\partial}{\partial x_1} + \ldots + dx_n\frac{\partial}{\partial x_n} + dy_1\frac{\partial}{\partial y_1} + \ldots + dy_m\frac{\partial}{\partial y_m}\right)^2\Psi + \\ + \frac{\partial\Psi}{\partial y_1}d^2y_1 + \ldots + \frac{\partial\Psi}{\partial y_m}d^2y_m.$$

Но в точке возможного экстремума M_0 справедливы равенства

$$\frac{\partial\Psi}{\partial y_1} = 0, \ldots, \frac{\partial\Psi}{\partial y_m} = 0,$$

так что $d^2\Psi$ определяться той же формулой

$$d^2\Psi = \left(dx_1\frac{\partial}{\partial x_1} + \ldots + dx_n\frac{\partial}{\partial x_n} + dy_1\frac{\partial}{\partial y_1} + \ldots + dx_m\frac{\partial}{\partial y_m}\right)^2\Psi, \tag{15.56}$$

что и в случае, когда все переменные $x_1, \ldots, x_n, y_1, \ldots, y_m$ независимы. Далее, заметим, что поскольку нам требуется установить знакоопределенность $d^2\Psi$ *лишь при наличии связей* (15.41), то при проведении вычислений следует в формулу (15.56) для $d^2\Psi$ подставить вместо $dy_1, \ldots, dy_m$ их значения, определяемые из системы (15.47). После этого следует изучить вопрос о знакоопределенности $d^2\Psi$ в данной точке M_0. Теперь мы можем перейти к рассмотрению примера.

---

[1]) Это вытекает из того, что при наличии связей (15.41) разность $f(M) - f(M_0)$ совпадает с разностью $\Psi(M) - \Psi(M_0)$.

4. Пример. Предположим, что нам требуется найти максимальное и минимальное значения величины определителя

$$\Delta = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & \dots & z_1 \\ x_2 & y_2 & \dots & z_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_n & y_n & \dots & z_n \end{vmatrix}, \tag{15.57}$$

причем известна сумма квадратов элементов каждой строки этого определителя. Задача сводится к отысканию экстремальных значений функции n^2 переменных (15.57) при наличии следующих n условий связи [1]):

$$\begin{gathered} x_1^2 + y_1^2 + \ldots + z_1^2 = h_1, \\ x_2^2 + y_2^2 + \ldots + z_2^2 = h_2, \\ \dots\dots\dots\dots\dots \\ x_n^2 + y_n^2 + \ldots + z_n^2 = h_n, \end{gathered} \tag{15.58}$$

где $h_1, h_2, \ldots, h_n$ — заданные положительные числа [2]). Для решения поставленной задачи рассмотрим и решим более простую задачу. *Фиксируем у определителя* (15.57) *в экстремальной точке элементы всех строк, за исключением одной k-й строки.* В таком случае определитель (15.57) можно рассматривать как функцию n переменных $x_k, y_k, \ldots, z_k$. Явное выражение этой функции можно получить, разложив определитель по элементам k-й строки:

$$\Delta = x_k X_k + y_k Y_k + \ldots + z_k Z_k. \tag{15.59}$$

Здесь через $X_k, Y_k, \ldots, Z_k$ обозначены алгебраические дополнения соответствующих элементов $x_k, y_k, \ldots, z_k$. Так как элементы всех строк определителя, кроме k-й, фиксированы в экстремальной точке, то X_k, Y_k, ..., Z_k можно рассматривать как постоянные числа. Поставим задачу об отыскании *экстремумов функции* (15.59) *при наличии одного условия связи* [3])

$$x_k^2 + y_k^2 + \ldots + z_k^2 = h_k. \tag{15.60}$$

[1]) Вопрос о *существовании* экстремальных значений не вызывает сомнений, ибо функция (15.57) является *непрерывной* функцией своих n^2 переменных на замкнутом множестве (15.58).

[2]) Мы опускаем тривиальный случай, когда хотя бы одно из чисел $h_1, h_2, \ldots, h_n$ равно нулю. В этом случае определитель (15.57) тождественно равен нулю.

[3]) В качестве этого условия мы берем k-е из условий (15.58).

Для решения этой задачи составим функцию Лагранжа

$$\Psi = x_k X_k + y_k Y_k + \ldots + z_k Z_k + \lambda(x_k^2 + y_k^2 + \ldots + z_k^2 - h_k), \quad (15.61)$$

и для этой функции решим вопрос о безусловном экстремуме. Из условий

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x_k} = X_k + 2\lambda x_k = 0,$$
$$\frac{\partial \Psi}{\partial y_k} = Y_k + 2\lambda y_k = 0,$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$\frac{\partial \Psi}{\partial z_k} = Z_k + 2\lambda z_k = 0$$

находим координаты точки возможного экстремума

$$x_k = -\frac{X_k}{2\lambda}, \quad y_k = -\frac{Y_k}{2\lambda}, \quad \ldots, \quad z_k = -\frac{Z_k}{2\lambda}. \quad (15.62)$$

Постоянный множитель λ легко исключить из условия связи (15.60). Из этого условия находим два значения:

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{X_k^2 + Y_k^2 + \ldots + Z_k^2}{4h_k}} > 0, \quad \lambda_2 = -\sqrt{\frac{X_k^2 + Y_k^2 + \ldots + Z_k^2}{4h_k}} < 0.$$

(При этом мы снова опускаем тривиальный случай, когда все $X_k, Y_k, \ldots, Z_k$ равны нулю, ибо в этом случае определитель (15.59) тождественно равен нулю.)

Таким образом, мы получаем две точки возможного экстремума:

$$M_1\left(-\frac{X_k}{2\lambda_1}, -\frac{Y_k}{2\lambda_1}, \ldots, -\frac{Z_k}{2\lambda_1}\right) \text{ и } M_2\left(-\frac{X_k}{2\lambda_2}, -\frac{Y_k}{2\lambda_2}, \ldots, -\frac{Z_k}{2\lambda_2}\right).$$

Докажем, что в точке M_1 реализуется условный минимум, а в точке M_2 — условный максимум. Для этого вычислим второй дифференциал $d^2\Psi$ функции Лагранжа (15.61). Легко видеть, что

$$d^2\Psi = 2\lambda[(dx_k)^2 + (dy_k)^2 + \ldots + (dz_k)^2].$$

Из последней формулы вытекает, что $d^2\Psi$ представляет собой положительно определенную квадратичную форму при $\lambda = \lambda_1 > 0$ (т. е. в точке M_1) и отрицательно определенную — при $\lambda = \lambda_2 < 0$ (т. е. в точке M_2). Итак, функция (15.59) при наличии связи (15.60) имеет условный минимум в точке M_1 и условный максимум в точке M_2. Не вычисляя наибольшего и наименьшего значений функции (15.59) при наличии условия (15.60), заметим, что в той точке, в которой достигаются эти

значения, справедливы равенства (15.62), а стало быть, справедливы равенства

$$\frac{x_k}{X_k} = \frac{y_k}{Y_k} = \ldots = \frac{z_k}{Z_k}. \tag{15.63}$$

Возвратимся теперь к вычислению экстремальных значений определителя (15.57) при наличии n связей (15.58). Сохраняя смысл принятых выше обозначений $X_k, Y_k, \ldots, Z_k$, согласно известному свойству определителя для любого i, отличного от k, можем записать

$$x_i X_k + y_i Y_k + \ldots + z_i Z_k = 0 \quad (i \neq k). \tag{15.64}$$

Из равенств (15.63) и (15.64) находим, что

$$x_i x_k + y_i y_k + \ldots + z_i z_k = 0 \quad (\text{при } i \neq k). \tag{15.65}$$

Равенства (15.58) и (15.65) и правило перемножения определителей позволяют заключить, что при умножении определителя Δ самого на себя получается определитель, все элементы которого равны нулю, за исключением элементов главной диагонали, которые равны соответственно $h_1, h_2, \ldots, h_n$. Таким образом,

$$\Delta \cdot \Delta = \Delta^2 = h_1 h_2 \ldots h_n.$$

Стало быть, максимальное и минимальное значения величины определителя (15.57) при наличии условий (15.58) соответственно равны $+\sqrt{h_1 h_2 \ldots h_n}$ и $-\sqrt{h_1 h_2 \ldots h_n}$. Тем самым мы получаем, что

$$|\Delta| \leqslant \sqrt{h_1 h_2 \ldots h_n},$$

или

$$|\Delta| \leqslant \sqrt{(x_1^2 + \ldots + z_1^2)(x_2^2 + \ldots + z_2^2) \ldots (x_n^2 + \ldots + z_n^2)}. \tag{15.66}$$

Последнее неравенство, справедливое для произвольного определителя (15.57), называется *неравенством Адамара* [1]).

З а м е ч а н и е. При $n = 3$ неравенство Адамара (15.66) допускает простую геометрическую интерпретацию. В этом случае $|\Delta|$ представляет собой объем параллелепипеда, построенного на отрезках OA_1, OA_2 и OA_3, соединяющих начало координат O с точками $A_1(x_1, y_1, z_1)$, $A_2(x_2, y_2, z_2)$, $A_3(x_3, y_3, z_3)$. Неравенство (15.66) утверждает, что из всех параллелепипедов, имеющих ребра данной длины, наибольший объем имеет прямоугольный параллелепипед.

[1]) Жак Адамар — французский математик (1865–1963).

ДОПОЛНЕНИЕ

ЗАМЕНА ПЕРЕМЕННЫХ

В ряде вопросов анализа и других разделов математики встречается задача о замене переменных. Эта задача заключается в следующем. Предположим, что нам задано некоторое выражение

$$F\left(x, y, z, \frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y}, \ldots\right), \tag{15.67}$$

содержащее независимые переменные x, y, функцию $z = z(x, y)$ и ее частные производные. Вместо независимых переменных x и y и функции $z = z(x, y)$ вводятся новые независимые переменные u и v и новая функция $w = w(u, v)$, причем заданы соотношения, посредством которых u, v и w выражаются через x, y и z:

$$\begin{aligned} u &= \varphi(x, y, z), \\ v &= \psi(x, y, z), \\ w &= \chi(x, y, z). \end{aligned} \tag{15.68}$$

Требуется преобразовать выражение (15.67) к новым переменным u, v и w. При этом мы будем предполагать, что функции (15.68) достаточное число раз дифференцируемы и что систему (15.68) можно разрешить относительно x, y и z, а первые два уравнения (15.68) — относительно x и y.

Очевидно, для решения поставленной задачи достаточно выразить частные производные $\frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y}, \ldots$ через u, v, w, $\frac{\partial w}{\partial u}, \frac{\partial w}{\partial v}, \ldots$ Укажем, как это можно сделать.

Имея в виду, что $z = z(x, y)$, а $w = w(u, v)$, запишем первые дифференциалы функций (15.68). Получим

$$du = \frac{\partial \varphi}{\partial x}\,dx + \frac{\partial \varphi}{\partial y}\,dy + \frac{\partial \varphi}{\partial z}\,dz = \frac{\partial \varphi}{\partial x}\,dx + \frac{\partial \varphi}{\partial y}\,dy + \frac{\partial \varphi}{\partial z}\left(\frac{\partial z}{\partial x}\,dx + \frac{\partial z}{\partial y}\,dy\right), \tag{15.69}$$

$$dv = \frac{\partial \psi}{\partial x}\,dx + \frac{\partial \psi}{\partial y}\,dy + \frac{\partial \psi}{\partial z}\,dz = \frac{\partial \psi}{\partial x}\,dx + \frac{\partial \psi}{\partial y}\,dy + \frac{\partial \psi}{\partial z}\left(\frac{\partial z}{\partial x}\,dx + \frac{\partial z}{\partial y}\,dy\right), \tag{15.70}$$

$$dw = \frac{\partial w}{\partial u}du + \frac{\partial w}{\partial v}dv = \frac{\partial \chi}{\partial x}\,dx + \frac{\partial \chi}{\partial y}\,dy + \frac{\partial \chi}{\partial z}\left(\frac{\partial z}{\partial x}\,dx + \frac{\partial z}{\partial y}\,dy\right). \tag{15.71}$$

Подставляя в (15.71) du и dv, определяемые формулами (15.69) и (15.70), и приравнивая коэффициенты при dx и dy, получим систему двух уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial u}\left[\frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial x}\right] + \frac{\partial w}{\partial v}\left[\frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial x}\right] &= \frac{\partial \chi}{\partial x} + \frac{\partial \chi}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial x}, \\ \frac{\partial w}{\partial u}\left[\frac{\partial \varphi}{\partial y} + \frac{\partial \varphi}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial y}\right] + \frac{\partial w}{\partial v}\left[\frac{\partial \psi}{\partial y} + \frac{\partial \psi}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial y}\right] &= \frac{\partial \chi}{\partial y} + \frac{\partial \chi}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial x}, \end{aligned}$$

из которой легко выразить $\frac{\partial z}{\partial x}$ и $\frac{\partial z}{\partial y}$:

$$\frac{\partial z}{\partial x} = -\frac{\frac{\partial w}{\partial u}\frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial v}\frac{\partial \psi}{\partial x} - \frac{\partial \chi}{\partial x}}{\frac{\partial w}{\partial u}\frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial v}\frac{\partial \psi}{\partial z} - \frac{\partial \chi}{\partial z}}, \qquad \frac{\partial z}{\partial y} = -\frac{\frac{\partial w}{\partial u}\frac{\partial \varphi}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial v}\frac{\partial \psi}{\partial y} - \frac{\partial \chi}{\partial y}}{\frac{\partial w}{\partial u}\frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial v}\frac{\partial \psi}{\partial z} - \frac{\partial \chi}{\partial z}}.$$

Если выражение (15.67) зависит также и от частных производных второго порядка, то для определения этих производных через частные производные w по u и v следует записать первые дифференциалы от уже вычисленных производных первого порядка.

З а м е ч а н и е 1. Аналогично производится замена и в случае, когда старые переменные связаны с новыми не соотношениями (15.68), а неявными соотношениями вида [1])

$$\begin{aligned} &\Phi_1(u,v,w,x,y,z) = 0,\\ &\Phi_2(u,v,w,x,y,z) = 0,\\ &\Phi_3(u,v,w,x,y,z) = 0. \end{aligned} \tag{15.72}$$

З а м е ч а н и е 2. Мы ограничились случаем двух независимых переменных лишь для сокращения записи. Указанный прием применим для случая любого числа независимых переменных (и, в частности, для случая одной независимой переменной).

П р и м е р. Пусть z есть функция переменных x и y. Преобразовать выражение [2])

$$F = \Delta z = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}$$

к полярным координатам u и v:

$$x = u\cos v, \qquad y = u\sin v. \tag{15.73}$$

Отметим, что в данном примере производится лишь замена независимых переменных. Функция z остается при этом неизменной. Из (15.73) вытекает, что

$$dx = \cos v\,du - u\sin v\,dv, \qquad dy = \sin v\,du + u\cos v\,dv,$$

поэтому из соотношений

$$dz = \frac{\partial z}{\partial x}\,dx + \frac{\partial z}{\partial y}\,dy = \frac{\partial z}{\partial u}\,du + \frac{\partial z}{\partial v}\,dv$$

имеем

$$\frac{\partial z}{\partial x}(\cos v\,du - u\sin v\,dv) + \frac{\partial z}{\partial y}(\sin v\,du + u\cos v\,dv) = \frac{\partial z}{\partial u}\,du + \frac{\partial z}{\partial v}\,dv.$$

---

[1]) Допускающими, конечно, разрешимость как относительно u, v и w, так и относительно x, y и z.

[2]) Указанное выражение называется *оператором Лапласа.* Оно играет важную роль в матемашке и ее приложениях. Пьер Симон Лаплас — французский астроном, математик и физик (1749–1827).

Приравнивая коэффициенты при du и dv, найдем

$$\frac{\partial z}{\partial x}\cos v + \frac{\partial z}{\partial y}\sin v = \frac{\partial z}{\partial u},$$
$$-\frac{\partial z}{\partial x}u\sin v + \frac{\partial z}{\partial y}u\cos v = \frac{\partial z}{\partial v}.$$

Отсюда

$$\begin{aligned}\frac{\partial z}{\partial x} &= \cos v\frac{\partial z}{\partial u} - \frac{1}{u}\sin v\frac{\partial z}{\partial v},\\ \frac{\partial z}{\partial y} &= \sin v\frac{\partial z}{\partial u} + \frac{1}{u}\cos v\frac{\partial z}{\partial v}.\end{aligned} \tag{15.74}$$

Найдем теперь $\dfrac{\partial^2 z}{\partial x^2}$. Так как $\dfrac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \dfrac{\partial\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)}{\partial x}$, то из первой формулы (15.74) находим

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{\partial\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)}{\partial x} = \cos v\frac{\partial\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)}{\partial u} - \frac{1}{u}\sin v\frac{\partial\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)}{\partial v} =$$
$$= \cos v\frac{\partial}{\partial u}\left[\cos v\frac{\partial z}{\partial u} - \frac{1}{u}\sin v\frac{\partial z}{\partial v}\right] - \frac{1}{u}\sin v\frac{\partial}{\partial v}\left[\cos v\frac{\partial z}{\partial u} - \frac{1}{u}\sin v\frac{\partial z}{\partial v}\right].$$

После вычислений получим

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \cos^2 v\frac{\partial^2 z}{\partial u^2} - \frac{2}{u}\sin v\cos v\frac{\partial^2 z}{\partial u\partial v} + \frac{1}{u^2}\sin^2 v\frac{\partial^2 z}{\partial v^2} +$$
$$+ \frac{1}{u}\sin^2 v\frac{\partial z}{\partial u} + \frac{2}{u^2}\sin v\cos v\frac{\partial z}{\partial v}.$$

Аналогично, из второй формулы (15.74) находим

$$\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{\partial\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)}{\partial y} = \sin v\frac{\partial\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)}{\partial u} + \frac{1}{u}\cos v\frac{\partial\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)}{\partial v} =$$
$$= \sin^2 v\frac{\partial^2 z}{\partial u^2} + \frac{2}{u}\sin v\cos v\frac{\partial^2 z}{\partial u\partial v} + \frac{1}{u^2}\cos^2 v\frac{\partial^2 z}{\partial v^2} + \frac{1}{u}\cos^2 v\frac{\partial z}{\partial u} -$$
$$- \frac{2}{u^2}\sin v\cos v\frac{\partial z}{\partial v}.$$

Таким образом, в полярных координатах u и v оператор Лапласа $\Delta z = \dfrac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2 z}{\partial y^2}$ имеет следующий вид:

$$\Delta z = \frac{\partial^2 z}{\partial u^2} + \frac{1}{u}\frac{\partial z}{\partial u} + \frac{1}{u^2}\frac{\partial^2 z}{\partial v^2}.$$

ГЛАВА 16

НЕКОТОРЫЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ИСЧИСЛЕНИЯ

§ 1. Огибающая и дискриминантная кривая однопараметрического семейства плоских кривых

1. Предварительные замечания. Мы будем задавать плоские кривые либо при помощи параметрических уравнений

$$x = \varphi(\alpha), \quad y = \psi(\alpha), \tag{16.1}$$

где α — некоторый параметр, либо при помощи уравнений вида

$$F(x, y) = 0. \tag{16.2}$$

В дальнейшем нам понадобятся понятия *обыкновенной* и *особой* точек кривой.

Пусть кривая L определяется параметрическими уравнениями (16.1), причем функции $x = \varphi(\alpha)$ и $y = \psi(\alpha)$ имеют при $\alpha = \alpha_0$ непрерывные производные. Точку $M_0(x_0, y_0)$ кривой L, координаты x_0 и y_0 которой соответственно равны $\varphi(\alpha_0)$ и $\psi(\alpha_0)$, назовем *обыкновенной*, если

$$\varphi'^2(\alpha_0) + \psi'^2(\alpha_0) \neq 0. \tag{16.3}$$

Если же при $\alpha = \alpha_0$ выполняется соотношение

$$\varphi'^2(\alpha_0) + \psi'^2(\alpha_0) = 0, \tag{16.4}$$

то точку M_0 мы назовем *особой* точкой кривой L.

Пусть кривая L определяется уравнением (16.2), причем функция $F(x, y)$ дифференцируема в некоторой окрестности точки $M_0(x_0, y_0)$ этой кривой и имеет в указанной точке непрерывные частные производные по x и y. Точку $M_0(x_0, y_0)$ назовем

обыкновенной точкой кривой L, если в этой точке выполняется соотношение [1])

$$F_x'^2 + F_y'^2 \neq 0. \tag{16.5}$$

Если же в точке M_0 выполняется соотношение

$$F_x'^2 + F_y'^2 = 0, \tag{16.6}$$

то эту точку мы назовем *особой* точкой кривой L. Убедимся, что *если точка M_0 кривой L является обыкновенной, то в некоторой окрестности этой точки кривая L представляет собой либо график некоторой дифференцируемой функции $y = f(x)$, либо график некоторой дифференцируемой функции $x = g(y)$.* В самом деле, пусть кривая L определяется параметрическими уравнениями (16.1) и, кроме того, выполнено условие (16.3). Из непрерывности производных $\varphi'(\alpha)$ и $\psi'(\alpha)$ при $\alpha = \alpha_0$ и из условия (16.3) вытекает, что в некоторой окрестности α_0 хотя бы одна из этих производных, например $\varphi'(\alpha)$, не равна нулю.. Тогда функция $x = \varphi(\alpha)$ является дифференцируемой строго монотонной функцией в отмеченной окрестности. При этих условиях существует дифференцируемая монотонная обратная функция $\alpha = \varphi^{-1}(x)$. Подставляя эту функцию в выражение $y = \psi(\alpha)$, мы убедимся, что кривая L в некоторой окрестности точки M_0 представляет собой график дифференцируемой функции $y = f(x) = \psi[\varphi^{-1}(x)]$. Справедливость сформулированного утверждения для случая, когда кривая задается при помощи уравнения (16.2), вытекает из того, что в окрестности обыкновенной точки действует теорема 15.1 о неявных функциях, и поэтому прилегающий к обыкновенной точке участок кривой представляет собой график дифференцируемой функции $y = f(x)$ или функции $x = g(y)$.

Замечание 1. В геометрии точку M_0 кривой L называют обыкновенной, если в некоторой окрестности этой точки кривая L представляет собой график некоторой дифференцируемой функции, и особой, если в любой окрестности этой точки кривая L не может быть представлена в виде графика дифференцируемой функции. Мы видели, что точка кривой L, являющаяся обыкновенной согласно нашему определению, будет также обыкновенной с геометрической точки зрения. Можно привести примеры, когда точка кривой, являющаяся особой по нашему определению, будет обыкновенной с геометрической точки зрения. Таким образом, наше определение обыкновенной точки является более узким, чем геометрическое, но более удобным для приложений.

Введем теперь понятие *касания* кривых L_1 и L_2 в их общей точке M_0. Будем говорить, что кривые L_1 и L_2 *касаются* в их

---

[1]) Понятия обыкновенной и особой точек для кривой (16.2) уже были введены в п. 3 § 2 гл. 15.

общей точке M_0, если обе кривые имеют в точке M_0 касательные и эти касательные совпадают.

В дальнейшем нам понадобится *условие касания* двух кривых L_1 и L_2.

Пусть кривая L_1 определяется уравнением (16.1), а кривая L_2 — уравнением (16.2) и $M_0(x_0, y_0)$ — общая точка этих кривых (при этом координаты x_0 и y_0 отвечают значению $\alpha = \alpha_0$ параметра α). Будем считать, что точка M_0 является *обыкновенной* точкой кривых L_1 и L_2 и эти кривые *касаются* в точке M_0. Тогда эти кривые представляют собой в окрестности M_0 графики дифференцируемых функций. Ради определенности будем считать, что L_1 и L_2 являются графиками функций $y = f_1(x)$ и $y = f_2(x)$. Так как по условию кривые L_1 и L_2 касаются в точке $M_0(x_0, y_0)$, то угловые коэффициенты касательных в M_0 к графикам функций $f_1(x)$ и $f_2(x)$ равны, т. е.

$$f_1'(x_0) = f_2'(x_0). \tag{16.7}$$

Используя формулы дифференцирования функций, заданных параметрически (см. § 11 гл. 5), и формулы дифференцирования неявных функций (см. п. 2 § 2 гл. 15), получим

$$f_1'(x_0) = \frac{\psi'(\alpha_0)}{\varphi'(\alpha_0)}, \ f_2'(x_0) = -\frac{F_x'(M_0)}{F_y'(M_0)}. \tag{16.8}$$

Формулы (16.8) позволяют придать равенству (16.7) следующий вид:

$$\frac{\psi'(\alpha_0)}{\varphi'(\alpha_0)} = -\frac{F_x'(M_0)}{F_y'(M_0)}, \tag{16.9}$$

или

$$F_x'(M_0)\varphi'(\alpha_0) + F_y'(M_0)\psi'(\alpha_0) = 0. \tag{16.10}$$

Последнее соотношение мы будем в дальнейшем называть *условием касания в точке* M_0 *кривых* L_1 и L_2, заданных соответственно уравнениями (16.1) и (16.2). Опуская аргументы функций и используя обозначения $\varphi' = \dfrac{dx}{d\alpha}$ и $\psi' = \dfrac{dy}{d\alpha}$, мы запишем условие касания в следующей форме:

$$F_x'\frac{dx}{d\alpha} + F_y'\frac{dy}{d\alpha} = 0. \tag{16.11}$$

З а м е ч а н и е 2. Если в общей точке M_0 кривых L_1 и L_2, заданных соответственно уравнениями (16.1) и (16.2), выполнено условие касания (16.10) (или, что то же самое, (16.11)) и если при этом точка M_0 является обыкновенной точкой кривых L_1 и L_2, то кривые L_1 и L_2 касаются в точке M_0. В самом деле, из соотношений (16.3), (16.5) и из условия (16.10) вытекает либо

условие (16.9), либо условие $\frac{\varphi'(\alpha_0)}{\psi'(\alpha_0)} = -\frac{F'_y(M_0)}{F'_x(M_0)}$, т. е. равенство угловых коэффициентов касательных в общей точке M_0 кривых L_1 и L_2. Это и означает, что кривые L_1 и L_2 касаются в M_0. Заметим, что условие касания выполняется также и в случае, когда точка M_0 является особой точкой по крайней мере одной из кривых L_1 и L_2.

Итак, условие касания (16.10) выполняется как в случае, когда кривые L_1 и L_2 касаются в точке M_0, так и в случае, когда M_0 является особой точкой по крайней мере одной из этих кривых.

2. Однопараметрические семейства плоских кривых. Характеристические точки кривых семейства. В различных геометрических и физических задачах часто встречаются семейства плоских кривых. В геометрической оптике рассматриваются отраженные и преломленные пучки (семейства) лучей, в механике — семейства возможных траекторий материальной частицы в данном поле сил, в геометрии — семейства касательных к кривым линиям. Один из возможных способов задания такого рода семейства линий заключается в следующем. Рассматривается функция $F(x, y, \alpha)$ трех переменных x, y, α и для каждого значения параметра α из данного множества $\{\alpha\}$ [1]) определяется кривая семейства при помощи уравнения

$$F(x, y, \alpha) = 0. \qquad (16.12)$$

Мы будем говорить, что соотношение (16.12) определяет *однопараметрическое семейство плоских кривых*. Параметр α будем называть параметром семейства.

Рассмотрим примеры однопараметрических семейств плоских кривых.

1°. Уравнение $y - (x - \alpha)^2 = 0$ определяет семейство парабол, получаемых сдвигом по оси Ox параболы $y - x^2 = 0$ (рис. 16.1).

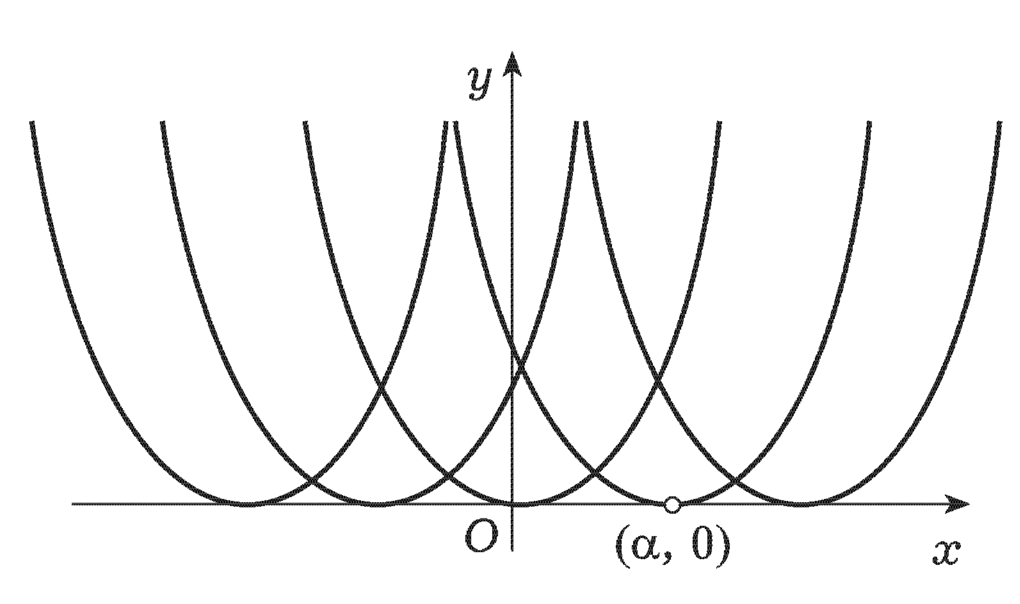


Рис. 16.1

2°. Уравнение $(y - \alpha)^2 - (x - \alpha)^3 = 0$ определяет семейство полукубических парабол, полученных параллельным сдвигом вдоль биссектрисы первого координатного угла полукубической параболы $y^2 = x^3$ (рис. 16.2).

1) Обычно множество $\{\alpha\}$ представляет собой некоторый интервал.

Пусть функция $F(x, y, \alpha)$ является дифференцируемой функцией в области ее задания. В этом случае можно ввести понятие *характеристической точки* кривой семейства, определяемого соотношением (16.12). Точка $M(x, y)$ называется *характеристической точкой* кривой семейства (16.12), отвечающей данному значению α параметра семейства, если координаты x и y этой точки удовлетворяют системе уравнений

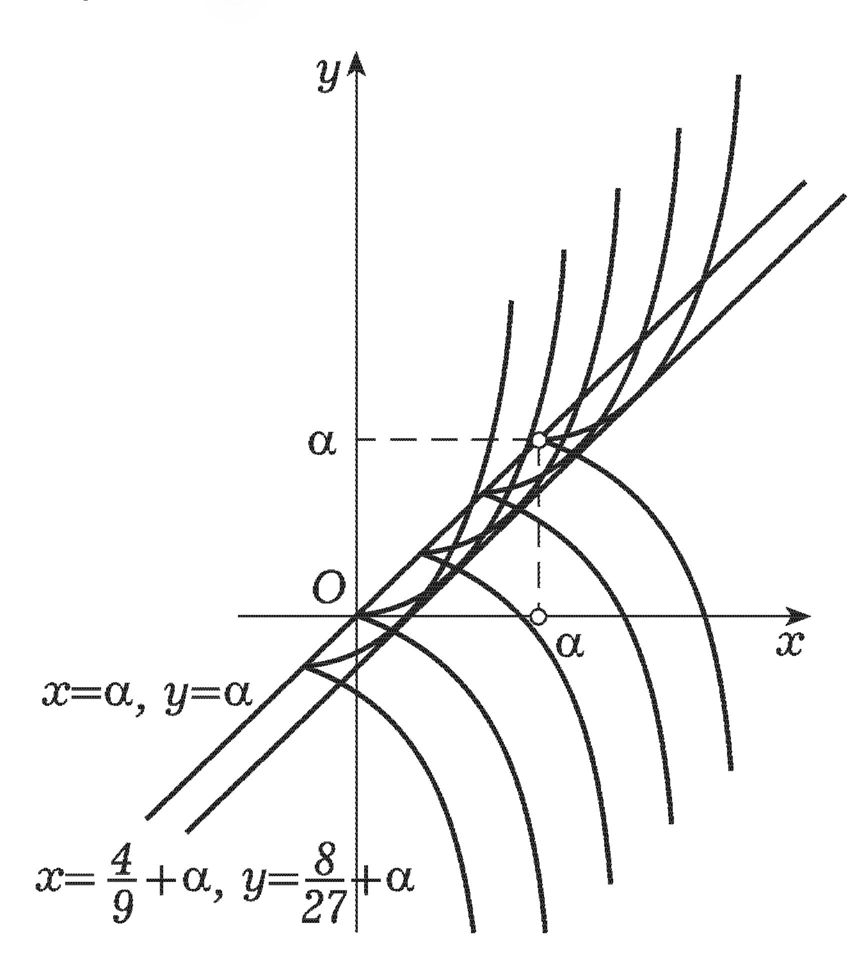


Рис. 16.2

$$F(x, y, \alpha) = 0, \qquad F'_\alpha(x, y, \alpha) = 0. \tag{16.13}$$

Рассмотрим геометрическую интерпретацию характеристической точки кривой семейства (16.12). Для простоты ограничимся случаем, когда любые две кривые семейства пересекаются [1]). Пусть L_α и $L_{\alpha+\Delta\alpha}$ — две кривые семейства (16.12), отвечающие значениям параметра α и $\alpha + \Delta\alpha$ (рис. 16.3). Координаты точки N их пересечения удовлетворяют следующей системе уравнений:

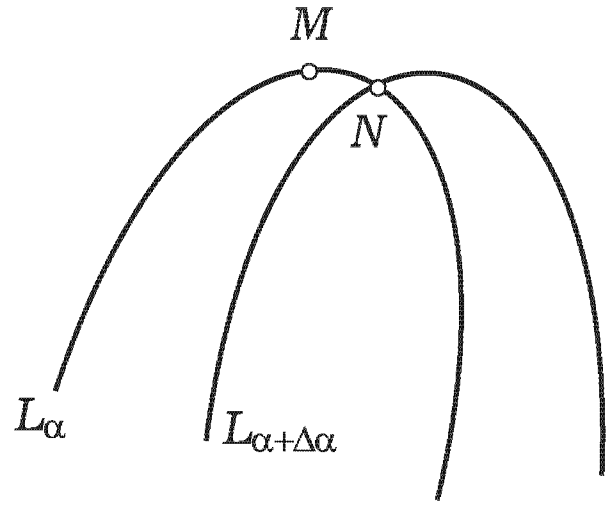


Рис. 16.3

$$F(x, y, \alpha) = 0, \quad F(x, y, \alpha + \Delta\alpha) = 0$$

или равносильной системе

$$F(x, y, \alpha) = 0, \qquad \frac{F(x, y, \alpha + \Delta\alpha) - F(x, y, \alpha)}{\Delta\alpha} = 0.$$

Если $\Delta\alpha \to 0$, то точка N, расположенная на кривой $F(x, y, \alpha) = 0$, стремится, вообще говоря, к некоторой точке M на этой кривой. Так как $\lim\limits_{\Delta\alpha \to 0} \dfrac{F(x, y, \alpha + \Delta\alpha) - F(x, y, \alpha)}{\Delta\alpha} = F'_\alpha(x, y, \alpha)$, то координаты точки M удовлетворяют уравнениям (16.13), и поэтому точка M является характеристической точкой кривой семейства. Итак, характеристическая точка данной кривой — это та точка, кото-

[1]) Существуют такие семейства кривых, любые две кривые которых не пересекаются. Примером такого семейства может служить семейство парабол, определяемых уравнением $y - (x - \alpha)^3 = 0$.

рая служит пределом при $\Delta\alpha \to 0$ точек пересечения данной кривой L_α и близкой к ней кривой $L_{\alpha+\Delta\alpha}$.

3. Огибающая и дискриминантная кривая однопараметрического семейства плоских кривых. Пусть однопараметрическое семейство плоских кривых определяется соотношением (16.12). При этом мы будем считать, что функция $F(x, y, \alpha)$ является дифференцируемой в области ее задания. Введем понятие *огибающей* семейства кривых (16.12).

Огибающей однопараметрического семейства кривых (16.12) *называется кривая* O, *которая* 1) *в каждой своей точке касается только одной кривой семейства* (16.12), 2) *в разных точках касается различных кривых указанного семейства.* Наглядные геометрические соображения наводят на мысль о том, что огибающая касается кривых семейства в характеристических точках этих кривых и поэтому при определенных условиях может рассматриваться как геометрическое место характеристических точек кривых семейства. В самом деле, пусть M — точка касания огибающей O и кривой L_α семейства, отвечающей значению α параметра семейства (рис. 16.4), P — точка касания огибающей O и кривой $L_{\alpha+\Delta\alpha}$ семейства, отвечающей значению $\alpha+\Delta\alpha$ параметра, и N — точка пересечения кривых L_α и $L_{\alpha+\Delta\alpha}$. Наглядно ясно, что при $\Delta\alpha \to 0$ точки P и N стремятся к точке M, т. е. огибающая O касается кривой L_α именно в характеристической точке M этой кривой.

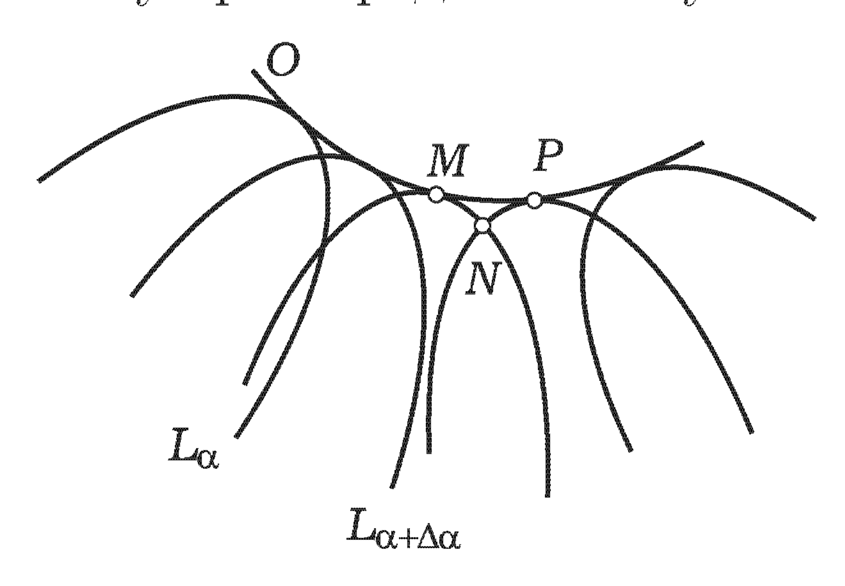


Рис. 16.4

Будем называть *дискриминантной кривой* семейства кривых (16.12) геометрическое место характеристических точек кривых этого семейства. Выясним, при каких условиях дискриминантная кривая является огибающей. Предварительно докажем следующую лемму.

Лемма. *Пусть $M_0(x_0, y_0)$ — характеристическая точка семейства $F(x, y, \alpha) = 0$, отвечающая значению α_0 параметра семейства. Пусть, далее, функции $F(x, y, \alpha)$ и $F'_\alpha(x, y, \alpha)$ дифференцируемы в некоторой окрестности точки (x_0, y_0, α_0) и частные производные этих функций по x и y непрерывны в самой точке (x_0, y_0, α_0). Тогда, если в точке (x_0, y_0, α_0) якобиан $\dfrac{D(F, F'_\alpha)}{D(x, y)}$ отличен от нуля, то дискриминантная кривая, проходящая через M_0, в некоторой окрестности этой точки может быть задана параметрическими уравнениями $x = \varphi(\alpha)$ и*

$y = \psi(\alpha)$, где $\varphi(\alpha)$ и $\psi(\alpha)$ — дифференцируемые в некоторой окрестности α_0 функции.

Доказательство. Так как точка $M_0(x_0, y_0)$ является характеристической точкой кривой семейства, отвечающей значению α_0 параметра семейства, то $F(x_0, y_0, \alpha_0) = 0$ и $F'_\alpha(x_0, y_0, \alpha_0) = 0$, и поэтому, в силу условий леммы, система уравнений (16.13), определяющая характеристические точки кривых семейства, удовлетворяет всем требованиям теоремы 15.2 о разрешимости системы уравнений относительно x и y. Следовательно, в некоторой окрестности точки α_0 определены две функции

$$x = \varphi(\alpha), \quad y = \psi(\alpha), \tag{16.14}$$

являющиеся единственным, непрерывным и дифференцируемым решением системы (16.13). Кривая, определяемая параметрическими уравнениями (16.14), состоит из характеристических точек и является поэтому дискриминантной кривой семейства, проходящей через точку M_0. Отметим, что в силу единственности решения системы (16.13), различные точки дискриминантной кривой, которая определяется параметрическими уравнениями (16.14), являются характеристическими точками различных кривых семейства (16.12). Укажем теперь дополнительные условия, при выполнении которых дискриминантная кривая, проходящая через точку M_0, в некоторой окрестности этой точки представляет собой *огибающую.*

Теорема 16.1. *Пусть кроме условий, сформулированных в лемме, выполняются следующие условия: 1) в некоторой окрестности точки (x_0, y_0, α_0) производные F'_x, F'_y, $F''_{\alpha x}$, $F''_{\alpha y}$ и $F''_{\alpha\alpha}$ непрерывны; 2) в точке (x_0, y_0, α_0) выполняются соотношения $F'^2_x + F'^2_y \neq 0$, $F''_{\alpha\alpha} \neq 0$. Тогда дискриминантная кривая, проходящая через характеристическую точку $M_0(x_0, y_0)$, является в некоторой окрестности этой точки огибающей рассматриваемого семейства кривых.*

Доказательство. Мы уже убедились, что некоторый участок дискриминантной кривой, проходящей через точку M_0, при сформулированных условиях может быть задан параметрическими уравнениями (16.14), которые представляют собой решение системы (16.13). Подставим это решение в уравнения (16.13) и продифференцируем по α полученные тождества $F(x, y, \alpha) \equiv 0$ и $F'_\alpha(x, y, \alpha) \equiv 0$. Получим

$$\begin{aligned} F'_x \frac{dx}{d\alpha} + F'_y \frac{dy}{d\alpha} + F'_\alpha \equiv 0, \\ F''_{\alpha x} \frac{dx}{d\alpha} + F''_{\alpha y} \frac{dy}{d\alpha} + F''_{\alpha\alpha} \equiv 0. \end{aligned} \tag{16.15}$$

Так как $F'_\alpha \equiv 0$, то первое соотношение (16.15) примет вид

$$F'_x \frac{dx}{d\alpha} + F'_y \frac{dy}{d\alpha} \equiv 0.$$

Мы видим, что в каждой точке рассматриваемой дискриминантной кривой выполняется условие касания (16.11) этой кривой и соответствующей кривой семейства. Поэтому, в силу замечания 2 из п. 1, для завершения доказательства теоремы достаточно установить, что каждая характеристическая точка кривой семейства, расположенная в некоторой окрестности точки M_0, и каждая точка дискриминантной кривой в этой окрестности являются обыкновенными. По условию теоремы в точке (x_0, y_0, α_0) выполняется соотношение $F'^2_x + F'^2_y \neq 0$, которое, в силу непрерывности частных производных F'_x и F'_y, будет выполнено и в некоторой окрестности указанной точки. Следовательно, в этой окрестности все характеристические точки кривых семейства являются обыкновенными. Из соотношения $F''_{\alpha\alpha} \neq 0$ (справедливого, в силу непрерывности этой производной, в некоторой окрестности точки (x_0, y_0, α_0)) и из второго тождества (16.15) вытекает, что в указанной окрестности производные $\frac{dx}{d\alpha}$ и $\frac{dy}{d\alpha}$ не обращаются одновременно в нуль [1]). Таким образом, все точки дискриминантной кривой в некоторой окрестности M_0 являются обыкновенными. Из только что доказанной леммы вытекает также, что различные точки дискриминантной кривой являются характеристическими точками различных кривых семейства. Теорема доказана.

З а м е ч а н и е 1. Рассуждения, проведенные при доказательстве теоремы, показывают, что в случае, когда выполнены только условия леммы, в каждой точке дискриминантной кривой выполнено условие касания этой кривой и кривой семейства. Мы уже отмечали (см. замечание 2 п. 1), что условие касания выполняется и тогда, когда общая точка двух кривых является особой точкой по крайней мере одной из них. Отсюда вытекает, что дискриминантная кривая может представлять собой геометрическое место особых точек кривых семейства (если в каждой характеристической точке выполняется условие $F'^2_x + F'^2_y = 0$). Отметим, что и сама дискриминантная кривая может иметь особые точки (если $\frac{dx}{d\alpha}$ и $\frac{dy}{d\alpha}$ равны одновременно нулю).

---

[1]) Непрерывность этих производных непосредственно вытекает из непрерывности производных F'_x, F'_y, $F''_{\alpha x}$, $F''_{\alpha y}$ и $F''_{\alpha\alpha}$ и из соотношений (16.15), из которых эти производные $\frac{dx}{d\alpha}$ и $\frac{dy}{d\alpha}$ могут быть найдены алгебраически.

Замечание 2. Теорема 16.1 геометрически может быть истолкована следующим образом. *Если все кривые семейства и дискриминантная кривая не имеют особых точек, то указанная дискриминантная кривая является огибающей.*

Рассмотрим примеры.

1°. Найти дискриминантную кривую семейства $y-(x-\alpha)^2=0$.

Имеем $F(x,y,\alpha)=y-(x-\alpha)^2$, $F'_\alpha(x,y,\alpha)=2(x-\alpha)$. Таким образом, система (16.13) имеет вид

$$y-(x-\alpha)^2=0, \quad 2(x-\alpha)=0.$$

Отсюда вытекает, что характеристические точки имеют координаты $(\alpha,0)$ (см. рис. 16.1). Поэтому дискриминантная кривая задается параметрическими уравнениями

$$x=\alpha, \quad y=0.$$

Имеем, далее, $F'_x=-2(x-\alpha)$, $F'_y=1$. В точках дискриминантной кривой $F'^2_x+F'^2_y=1$. Кроме того, $F''_{\alpha\alpha}=-2\neq 0$. Таким образом, дискриминантная кривая — ось Ox является огибающей.

2°. Найти дискриминантную кривую семейства $(y-\alpha)^2-(x-\alpha)^3=0$. Имеем $F(x,y,\alpha)=(y-\alpha)^2-(x-\alpha)^3$, $F'_\alpha(x,y,\alpha)=-2(y-\alpha)+3(x-\alpha)^2$. Система (16.13) имеет вид

$$(y-\alpha)^2-(x-\alpha)^3=0, \quad -2(y-\alpha)+3(x-\alpha)^2=0.$$

Отсюда вытекает, что дискриминантная кривая представляет собой две прямые линии, определяемые параметрическими уравнениями

$$x=\alpha,\ y=\alpha \text{ и } x=\frac{4}{9}+\alpha,\ y=\frac{8}{27}+\alpha$$

(см. рис. 16.2). Легко убедиться, что в точках прямой $x=\alpha$, $y=\alpha$ выполняется условие $F'^2_x+F'^2_y=0$, т. е. эта часть дискриминантной кривой представляет собой геометрическое место особых точек кривых семейства. Читатель легко убедится, что прямая $x=\dfrac{4}{9}+\alpha$, $y=\dfrac{8}{27}+\alpha$ является огибающей рассматриваемого семейства линий.

4. Огибающая и дискриминантная поверхность однопараметрического семейства поверхностей. Рассмотрим однопараметрическое семейство поверхностей, определяемое уравнением

$$F(x,y,z,\alpha)=0. \tag{16.16}$$

При этом мы будем предполагать, что функция $F(x,y,z,\alpha)$ является дифференцируемой функцией в области ее задания. Линия L на поверхности

семейства (16.16), отвечающей значению α параметра семейства, называется *характеристической* (или характеристикой), если координаты точек этой линии удовлетворяют системе уравнений

$$\begin{aligned} F(x, y, z, \alpha) &= 0, \\ F'_\alpha(x, y, z, \alpha) &= 0. \end{aligned} \tag{16.17}$$

Геометрическое место характеристик называется *дискриминантной поверхностью* семейства (16.17). *Огибающей однопараметрического семейства поверхностей* (16.16) *называется поверхность* O, *которая касается всех поверхностей семейства.*

Можно доказать следующее утверждение.

Если все поверхности семейства и дискриминантная поверхность не имеют особых точек, то указанная дискриминантная поверхность является огибающей.

Отметим, что дискриминантная поверхность может представлять собой геометрическое место особых точек поверхностей семейства и сама может иметь особые точки.

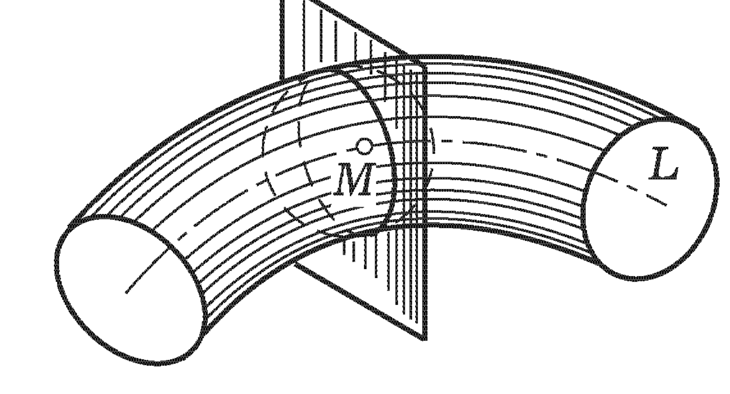


Рис. 16.5

Рассмотрим следующий пример. Найти огибающую семейства сфер постоянного радиуса R, центры которых находятся в точках данной кривой L [1]) (на рис. 16.5 изображена одна такая сфера с центром в точке M кривой L), определяемой уравнениями

$$x = \varphi(\alpha), \quad y = \psi(\alpha), \quad z = \chi(\alpha).$$

Рассматриваемое однопараметрическое семейство сфер определяется следующим уравнением:

$$[x - \varphi(\alpha)]^2 + [y - \psi(\alpha)]^2 + [z - \chi(\alpha)]^2 - R^2 = 0. \tag{16.18}$$

Характеристики указанного семейства сфер определяются из уравнения (16.18) и уравнения

$$[x - \varphi(\alpha)]\varphi'(\alpha) + [y - \psi(\alpha)]\psi'(\alpha) + [z - \chi(\alpha)]\chi'(\alpha) = 0. \tag{16.19}$$

Уравнение (16.19) представляет собой плоскость, проходящую через центр M сферы, перпендикулярно касательной к кривой L. Поэтому характеристиками являются окружности, представляющие собой линии пересечения рассматриваемых сфер с плоскостями (16.19) (см. рис. 16.5). Отметим, что если L является окружностью, то огибающей будет тор.

§ 2. Соприкосновение плоских кривых

1. Понятие порядка соприкосновения плоских кривых. Пусть две кривые L_1 и L_2 касаются друг друга в некоторой точке M_0 [2]) (рис. 16.6). Пусть далее M — произвольная точка

---

[1]) Огибающие таких семейств сфер называются *каналовыми поверхностями.*

[2]) То есть проходят через M_0 и имеют в этой точке совпадающие касательные.

на общей касательной к кривым L_1 и L_2, а M_1 и M_2 — точки пересечения с кривыми L_1 и L_2 соответственно перпендикуляра к указанной касательной, восстановленного в точке M [1]) (см. рис. 16.6). Будем говорить, что *две кривые* L_1 *и* L_2 *имеют в точке* M_0 *порядок соприкосновения* n, *если существует отличный от нуля предел*

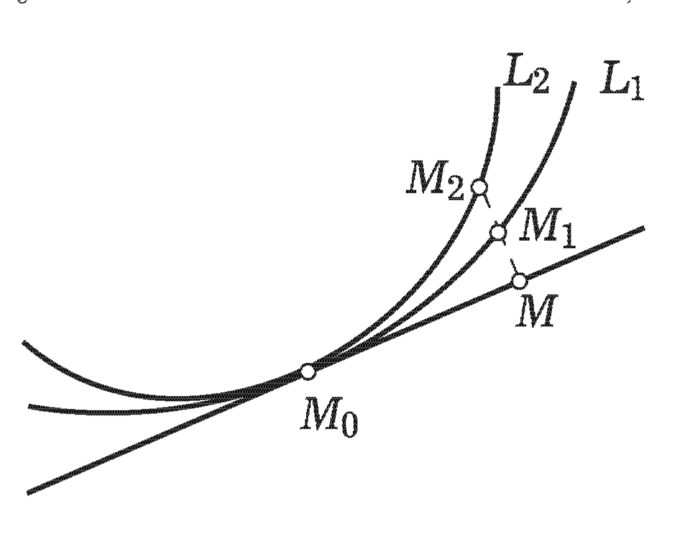


Рис. 16.6

$$\lim_{M \to M_0} \frac{|M_1 M_2|}{|M M_0|^{n+1}}. \tag{16.20}$$

(При этом $|M_1 M_2|$ обозначает длину отрезка $M_1 M_2$, а $|M M_0|$ — длину отрезка $M M_0$.)

З а м е ч а н и е 1. Если предел (16.20) равен нулю, то говорят, что кривые L_1 и L_2 имеют порядок соприкосновения *выше* n.

З а м е ч а н и е 2. Если две кривые L_1 и L_2 имеют в точке M_0 порядок соприкосновения выше *любого* n, то говорят, что они имеют в этой точке *бесконечный порядок соприкосновения.*

П р и м е р ы. 1°. Кривые, являющиеся графиками функций $y = x^2$ и $y = 3x^2$, касаются друг друга в начале координат O, причем их общей касательной служит ось Ox. Взяв на оси Ox точку M с абсциссой x, мы получим, что $|OM| = |x|$, а $|M_1 M_2| = |3x^2 - x^2| = 2x^2$.

Поскольку

$$\lim_{M \to 0} \frac{|M_1 M_2|}{|OM|^2} = \lim_{x \to 0} \frac{2x^2}{|x|^2} = 2 \neq 0,$$

то рассматриваемые кривые имеют в точке O порядок соприкосновения единица.

2°. Рассмотрим, далее, две кривые L_1 и L_2, первая из которых совпадает с осью Ox, а другая является графиком функции

$$y = \begin{cases} e^{-1/|x|} & \text{при} \quad x \neq 0, \\ 0 & \text{при} \quad x = 0. \end{cases}$$

Убедимся, что указанные кривые имеют бесконечный порядок соприкосновения в начале координат O. Так как общей касательной в точке O служит ось Ox, то, взяв на этой оси точку M с абсциссой x, мы получим, что $|OM| = |x|$, а $|M_1 M_2| = e^{-1/|x|}$. Достаточно доказать, что для любого n предел $\lim\limits_{M \to 0} \dfrac{|M_1 M_2|}{|OM|^{n+1}} =$

[1]) При этом предполагается, что если точка M достаточно близка к M_0, то перпендикуляр, восстановленный в точке M к касательной, пересекает каждую кривую L_1 и L_2 лишь в одной точке.

$= \lim\limits_{x \to 0} \dfrac{e^{-1/|x|}}{|x|^{n+1}}$ равен нулю. Полагая $t = 1/|x|$, мы сведем этот предел к пределу $\lim\limits_{t \to +\infty} \dfrac{t^{n+1}}{e^t}$. В конце п. 2 § 12 гл. 8 доказано, что последний предел равен нулю.

2. Порядок соприкосновения кривых, являющихся графиками функций. Предположим, что две кривые L_1 и L_2 являются графиками функций $y = f_1(x)$ и $y = f_2(x)$ соответственно. Предположим, далее, что эти кривые касаются друг друга в некоторой точке $M_0(x_0, f_1(x_0))$, причем точка M_0 является обыкновенной для каждой из этих кривых [1]). Мы докажем, что при этих предположениях данное в предыдущем пункте определение порядка соприкосновения кривых L_1 и L_2 можно заменить другим эквивалентным определением, более удобным для приложений.

Пусть Δx — произвольное приращение аргумента в точке x_0, а $x = x_0 + \Delta x$. Будем говорить, что *кривые L_1 и L_2 имеют в точке $M_0(x_0, f_1(x_0))$ порядок соприкосновения n, если существует отличный от нуля предел*

$$\lim_{\Delta x \to 0} \frac{|f_2(x_0 + \Delta x) - f_1(x_0 + \Delta x)|}{|\Delta x|^{n+1}} = \lim_{x \to x_0} \frac{|f_2(x) - f_1(x)|}{|x - x_0|^{n+1}}. \qquad (16.21)$$

Для того чтобы можно было говорить о порядке соприкосновения рассматриваемых кривых L_1 и L_2 в смысле определения, данного в предыдущем пункте, нужно прежде всего доказать, что в некоторой окрестности M_0 эти кривые *однозначно* проецируются на свою общую касательную. Этому посвящена приводимая ниже лемма 1. Остальная часть настоящего пункта посвящена доказательству еще двух лемм, из которых непосредственно вытекает эквивалентность двух определений порядка соприкосновения кривых L_1 и L_2.

Лемма 1. *Если точка $M_0(x_0, f(x_0))$ является обыкновенной точкой кривой L, служащей графиком функции $y = f(x)$, то кривая L в некоторой окрестности M_0 однозначно проецируется на свою касательную.*

Доказательство. Прежде всего, отметим, что существование касательной к кривой L в точке M_0 вытекает из существования производной $f'(x_0)$. Перейдем теперь к новой системе декартовых прямоугольных координат XY, поместив новое начало в точку касания M_0 и направив ось X вдоль касательной в M_0 (рис. 16.7). Если через α обозначить угол между осью x и осью X, то очевидно, что новая система координат получается из старой посредством переноса начала в точку $M_0(x_0, f(x_0))$ и поворота осей на угол α. Используя известные формулы преобразования координат

[1]) Определение обыкновенной точки кривой, заданной уравнением $F(x, y) = 0$, было дано в п. 1 § 1. В частности, для кривой, заданной уравнением $y = f(x)$, точка $M_0(x_0, f(x_0))$ будет обыкновенной, если производная $f'(x)$ лишь непрерывна в точке x_0.

при переносе и повороте осей (см. выпуск 8), получим следующее выражение новых координат X, Y точек кривой L через старые координаты x и $y = f(x)$:

$$\begin{aligned} X &= (x - x_0)\cos\alpha + [f(x) - f(x_0)]\sin\alpha, \\ Y &= -(x - x_0)\sin\alpha + [f(x) - f(x_0)]\cos\alpha. \end{aligned} \tag{16.22}$$

Наша цель будет достигнута, если мы покажем, что из уравнений (16.22) можно выразить Y как функцию X (это и будет означать, что участок кривой L, примыкающий к M_0, однозначно проецируется на ось X, т. е. на касательную). Для этого достаточно доказать, что в окрестности точки M_0 первое из уравнений (16.22) однозначно разрешимо относительно x. (В самом деле, выразив x через X из первого уравнения (16.22) и подставив полученное выражение во второе уравнение (16.22), мы и определим Y как функцию X.) Согласно теореме 15.1 достаточно доказать, что производная по x правой части первого из уравнений (16.22) отлична от нуля в точке x_0 и непрерывна в этой точке. Но это очевидно, ибо указанная производная имеет вид $\cos\alpha + f'(x)\sin\alpha$ и в точке x_0, в которой $f'(x_0) = \operatorname{tg}\alpha$, равна $1/\cos\alpha$. Так как $\alpha \neq \pi/2$, то $\cos\alpha \neq 0$. Лемма доказана.

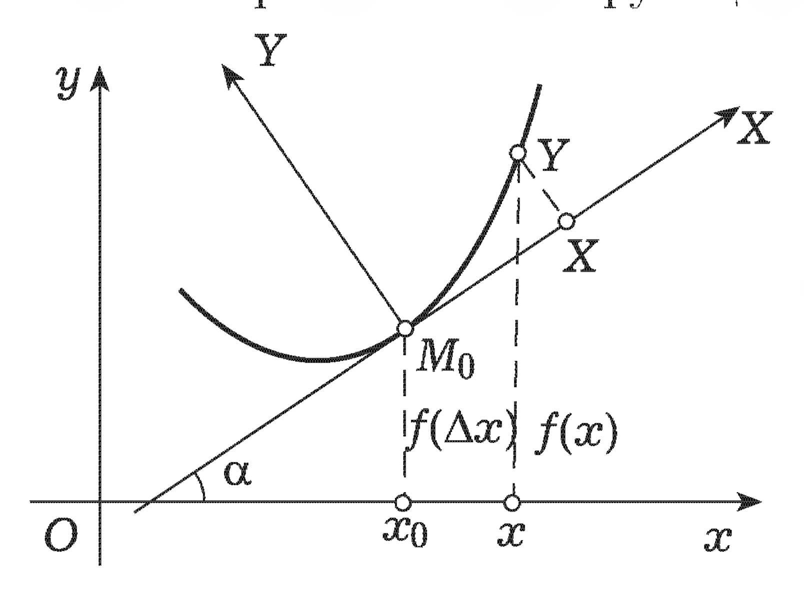


Рис. 16.7

Пусть кривые L_1 и L_2, представляющие собой графики функций $y = f_1(x)$ и $y = f_2(x)$, касаются друг друга в точке $M_0(x_0, f_1(x_0))$, которая является обыкновенной для каждой из этих кривых, а $x = x_0 + \Delta x$. Пусть, далее, из точки $M_2(x, f_2(x))$ опущен перпендикуляр на касательную в M_0 (рис. 16.8), M_1 — точка пересечения этого перпендикуляра с кривой L_1 [1]), а M — с касательной. Тогда справедливы следующие утверждения.

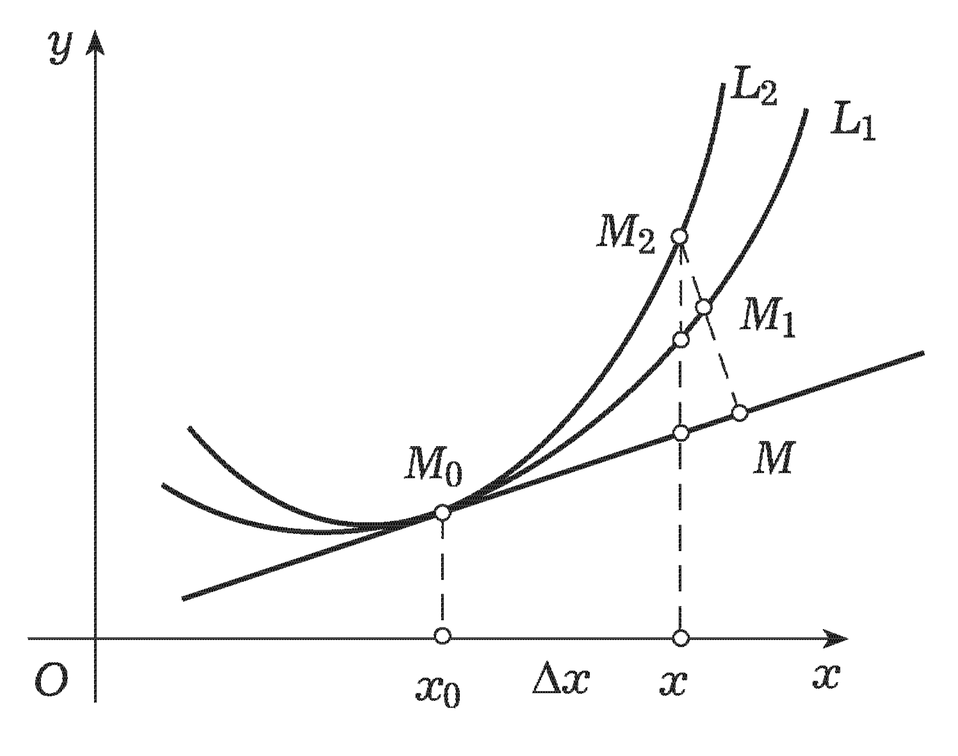


Рис. 16.8

Лемма 2. *Существует отличный от нуля предел*

$$\lim_{\Delta x \to 0} \frac{|f_2(x) - f_1(x)|}{|M_1M_2|}. \tag{16.23}$$

Лемма 3. *Существует отличный от нуля предел*

$$\lim_{\Delta x \to 0} \frac{|M_0M|}{|\Delta x|}. \tag{16.24}$$

Заметим, что из лемм 2 и 3 вытекает, что отличный от нуля предел (16.21) существует тогда и только тогда, когда существует отличный от нуля предел (16.20),

[1]) В силу леммы 1 при достаточно малом Δx такая точка будет только одна.

а это и означает эквивалентность двух определений порядка соприкосновения. Переходим к доказательству лемм 2 и 3.

Доказательство леммы 2. Ради простоты обозначим расстояние M_1M_2 через ρ и ради определенности будем считать, что кривые L_1 и L_2 расположены так, как указано на рис. 16.8. Если X и Y — координаты точки M_1, а α — угол наклона касательной в M_0 к оси Ox, то, очевидно,

$$X = x + \rho \sin\alpha, Y = f_2(x) - \rho\cos\alpha.$$

Так как точка M_1 лежит на кривой L_1, то $Y = f_1(X)$ или

$$f_2(x) - \rho\cos\alpha = f_1(x + \rho\sin\alpha).$$

Применяя к правой части последнего равенства формулу Лагранжа по сегменту $[x, x + \rho\sin\alpha]$, будем иметь

$$f_2(x) - \rho\cos\alpha = f_1(x) + \rho\sin\alpha f'(\xi),$$

где ξ — некоторая точка, лежащая внутри указанного сегмента. Так как $\rho \to 0$ при $\Delta x \to 0$ и производная $f'(x)$ непрерывна в точке x_0, то последнее равенство можно переписать в виде

$$f_2(x) - \rho\cos\alpha = f_1(x) + \\ + \rho\sin\alpha[f'(x_0) + \varepsilon], \quad (16.25)$$

где $\varepsilon \to 0$ при $\Delta x \to 0$. Учитывая, что $f'(x_0) = \operatorname{tg}\alpha$, мы получим из (16.25)

$$\frac{f_2(x) - f_1(x)}{\rho} = \frac{1}{\cos\alpha} + \varepsilon\sin\alpha.$$

Лемма 2 доказана.

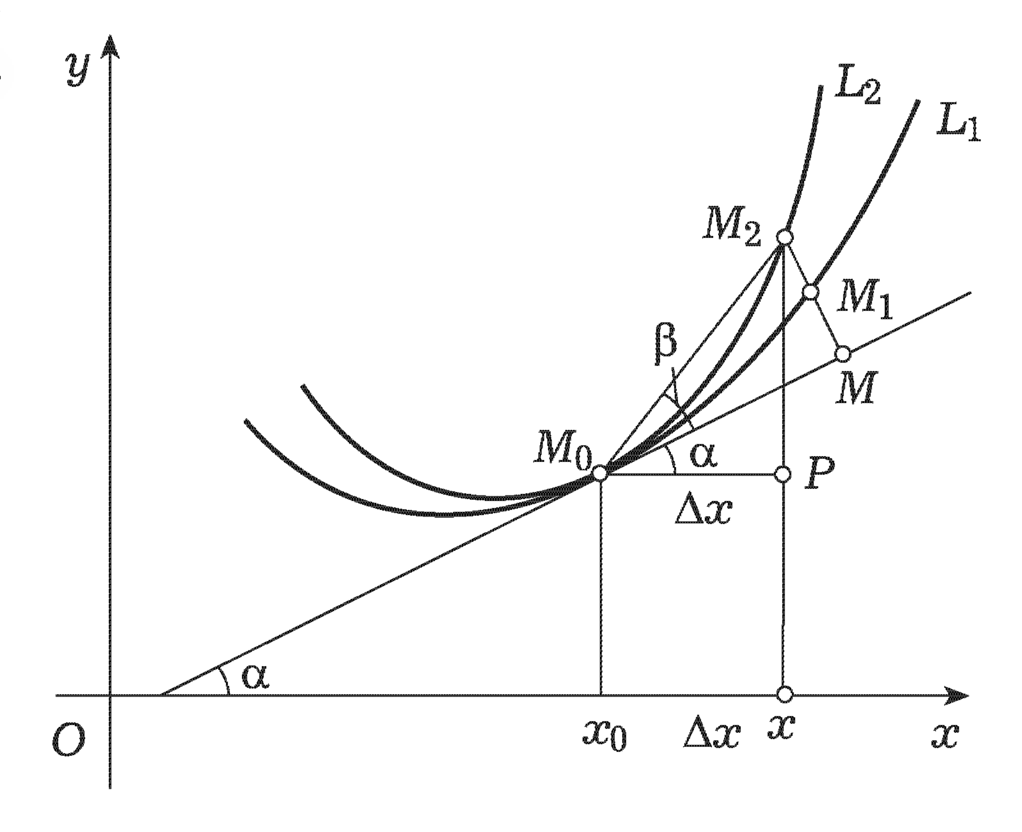


Рис. 16.9

Доказательство леммы 3. Обозначим через β угол между хордой M_0M_2 и касательной M_0M (рис. 16.9). Очевидно, что $\beta \to 0$ при $\Delta x \to 0$. Из прямоугольных треугольников M_0M_2P и M_0M_2M (здесь M_0P параллельно оси Ox) находим

$$|M_0M_2| = \frac{|\Delta x|}{\cos(\alpha+\beta)} = \frac{|M_0M|}{\cos\beta}.$$

Из последней формулы очевидно, что

$$\lim_{\Delta x\to 0}\frac{|M_0M|}{|\Delta x|} = \lim_{\Delta x\to 0}\frac{\cos\beta}{\cos(\alpha+\beta)} = \frac{1}{\cos\alpha}.$$

Лемма 3 доказана.

3. Достаточные условия соприкосновения порядка n. Пусть, как и выше, две кривые L_1 и L_2, служащие графиками функций $f_1(x)$ и $f_2(x)$, касаются друг друга в $M_0(x_0, f_1(x_0))$. Справедливое следующее утверждение.

Теорема 16.2. *Пусть функции $y = f_1(x)$ и $y = f_2(x)$ $(n+1)$ раз дифференцируемы в некоторой окрестности точки x_0, причем производные порядка $n+1$ непрерывны в самой точке x_0. Тогда, если в точке x_0 выполняются соотношения*

$$f_1(x_0) = f_2(x_0),\ f_1'(x_0) = f_2'(x_0),\ \ldots,\ f_1^{(n)}(x_0) = f_2^{(n)}(x_0),$$
$$f_1^{(n+1)}(x_0) \neq f_2^{(n+1)}(x_0), \tag{16.26}$$

то кривые L_1 и L_2 имеют в точке $M_0(x_0, f_1(x_0))$ порядок соприкосновения n.

Доказательство. Пусть $F(x) = f_2(x) - f_1(x)$. Достаточно доказать, что существует отличный от нуля предел

$$\lim_{x \to x_0} \frac{|F(x)|}{|x - x_0|^{n+1}}.$$

Так как в силу (16.26) $F(x_0) = F'(x_0) = \ldots = F^{(n)}(x_0) = 0$, $F^{(n+1)}(x_0) \neq 0$, то, записывая для функции $F(x)$ формулу Тейлора с остаточным членом в форме Лагранжа, будем иметь

$$F(x) = \frac{1}{(n+1)!} F^{(n+1)}(x_0 + \theta(x - x_0))(x - x_0)^{n+1},\ 0 < \theta < 1. \tag{16.27}$$

В силу непрерывности производной порядка $n+1$ в точке x_0

$$F^{(n+1)}(x_0 + \theta(x - x_0)) = F^{(n+1)}(x_0) + \varepsilon, \tag{16.28}$$

где $\varepsilon \to 0$ при $x \to x_0$. Из соотношений (16.27) и (16.28) получим, что

$$\lim_{x \to x_0} \frac{|F(x)|}{|x - x_0|^{n+1}} = \frac{1}{(n+1)!} |F^{n+1}(x_0)| \neq 0.$$

Теорема доказана.

Замечание 1. Если выполнены все условия теоремы 16.2, за исключением, быть может, условия $f_1^{(n+1)}(x_0) \neq f_2^{(n+1)}(x_0)$, то можно утверждать, что кривые L_1 и L_2 имеют в точке M_0 порядок соприкосновения *не ниже n*.

Замечание 2. Выясним порядок соприкосновения кривой L, являющейся графиком функции $y = f(x)$ со своей касательной T в точке $M_0(x_0, f(x_0))$. При этом будем считать, что функция $f(x)$ три раза дифференцируема в окрестности точки x_0, а ее третья производная непрерывна в точке x_0. Напомним, что касательная T служит графиком линейной функции $y = \varphi(x) = f'(x_0)(x - x_0) + f(x_0)$. Так как $\varphi(x_0) = f(x_0)$, $\varphi'(x_0) = f'(x_0)$ и $\varphi''(x_0) = 0$, то в случае $f''(x_0) \neq 0$ кривая L имеет со своей касательной T порядок соприкосновения $n = 1$, а в случае $f''(x_0) = 0$ указанный порядок соприкосновения не ниже двух.

4. Соприкасающаяся окружность. Пусть $M_0(x_0, y_0)$ — точка кривой L, являющейся графиком функции $y = f(x)$, имеющей непрерывную третью производную в точке x_0. Через точку M_0 можно провести бесконечно много окружностей, касающихся кривой L в этой точке. Легко убедиться в том, что часть каждой такой окружности, расположенная в некоторой окрестности точки M_0, представляет собой график функции вида $y = y(x)$. Поэтому мы можем говорить о порядке соприкосновения кривой L и любой из этих окружностей в их общей точке M_0. Та из этих окружностей, которая имеет с кривой L *порядок соприкосновения не ниже двух*, называется *соприкасающейся окружностью для кривой L в точке M_0*. Следующее утверждение устанавливает достаточные условия для существования у кривой L в точке M_0 соприкасающейся окружности.

Теорема 16.3. *Пусть кривая L является графиком функции $y = f(x)$, причем $f(x)$ имеет в точке x_0 не равную нулю вторую производную и непрерывную третью производную. Тогда для кривой L существует в точке $M_0(x_0, f(x_0))$ соприкасающаяся окружность.*

Доказательство. Будем искать уравнение соприкасающейся окружности в виде

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = \rho^2, \tag{16.29}$$

где a, b и ρ — постоянные, подлежащие определению. Разрешим уравнение (16.29) относительно y и найденное решение $y = y(x)$ подставим в левую часть (16.29). Тогда мы можем рассматривать (16.29) как тождество относительно x (считая при этом, конечно, что $y = y(x)$). Продифференцируем тождество (16.29) два раза по x и потребуем, чтобы в полученных при этом соотношениях и в самом соотношении (16.29) значения y_0, y_0', y_0'' функции $y = y(x)$ и ее первых двух производных в точке x_0 равнялись соответственно $f(x_0)$, $f'(x_0)$, $f''(x_0)$:

$$y_0 = f(x_0), \quad y_0' = f'(x_0), \quad y_0'' = f''(x_0).$$

Таким образом, мы получим следующую систему уравнений относительно a, b и ρ:

$$\begin{aligned} (x_0 - a)^2 + (y_0 - b)^2 &= \rho^2, \\ (x_0 - a) + (y_0 - b)y_0' &= 0, \\ 1 + (y_0')^2 + (y_0 - b)y_0'' &= 0. \end{aligned}$$

При условии $y'' = f''(x_0) \neq 0$, $\rho > 0$ эта система имеет единственное решение:

$$a = x_0 - \frac{1 + y_0'^2}{y_0''}y_0', \quad b = y_0 + \frac{1 + y_0'^2}{y_0''}, \quad \rho = \frac{(1 + y_0'^2)^{3/2}}{|y_0''|}. \tag{16.30}$$

Из приведенных рассуждений вытекает, что для окружности, координаты (a, b) центра и радиус ρ которой определяются формулами (16.30), и кривой L выполняются все условия замечания 1 к теореме 16.2. Поэтому указанная окружность будет соприкасающейся.

З а м е ч а н и е. Если в условиях теоремы 16.3 требование $f''(x_0) \neq 0$ заменить противоположным требованием $f''(x_0) = 0$, то у кривой L в точке M_0 не существует соприкасающейся окружности.

Однако в силу замечания 2 к теореме 16.2 в этом случае кривая L и касательная к ней в точке M_0 имеют в этой точке порядок соприкосновения не ниже двух. Таким образом, можно считать, что в указанном случае соприкасающаяся окружность в точке M_0 вырождается в прямую.

§ 3. Кривизна плоской кривой

1. Понятие о кривизне плоской кривой. Пусть кривая L задана посредством параметрических уравнений $x = x(t)$, $y = y(t)$. Будем считать, что для кривой L выполнены условия, оговоренные в § 1 гл. 11 [1]). В таком случае в любой точке M кривой L можно выбрать положительное направление. Договоримся называть положительным направлением в данной точке M кривой L то направление, в котором точка M будет перемещаться при увеличении параметра t.

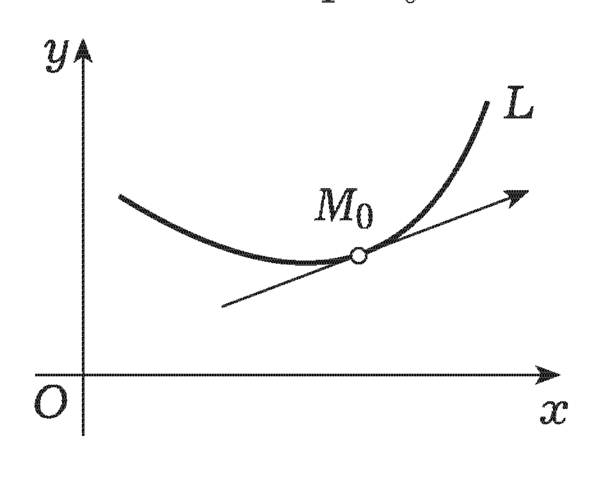


Рис. 16.10

Фиксируем теперь на кривой L некоторую точку M_0, отвечающую значению параметра t_0, и предположим, что эта точка является *обыкновенной точкой* кривой L.

Тогда участок кривой L, примыкающий к точке M_0, представляет собой график функции вида либо $y = f(x)$, либо $x = f_1(y)$, причем существует касательная к кривой L в точке M_0. На этой касательной мы введем положительное направление, соответствующее положительному направлению в точке M_0 кривой L [2]).

Всюду в дальнейшем мы будем рассматривать только направленную касательную. На рис. 16.10 направление касательной указано стрелкой.

---

[1]) То есть будем считать, что кривая L не имеет точек самопересечения и участков самоналегания.

[2]) То есть договоримся называть положительным направлением на касательной то направление, в котором точка, представляющая собой проекцию на касательную точки кривой L, при увеличении параметра будет перемещаться.

Предположим теперь, что *все точки кривой* L, расположенные в некоторой окрестности фиксированной нами точки M_0, *являются обыкновенными*. Пусть M — одна из указанных точек. Введем понятие *угла смежности* участка кривой M_0M. Ради определенности будем считать, что точка M соответствует большему значению параметра, чем M_0.

Углом смежности участка кривой M_0M назовем угол между направленными касательными к кривой L в точках M и M_0, взятый со знаком плюс в случае, если касательную в точке M_0 для совмещения кратчайшим путем с касательной в точке M следует повернуть против часовой стрелки, и со знаком минус — в противном случае.

На рис. 16.11 изображен участок M_0M, имеющий положительный угол смежности, а на рис. 16.12 — участок M_0M, имеющий отрицательный угол смежности.

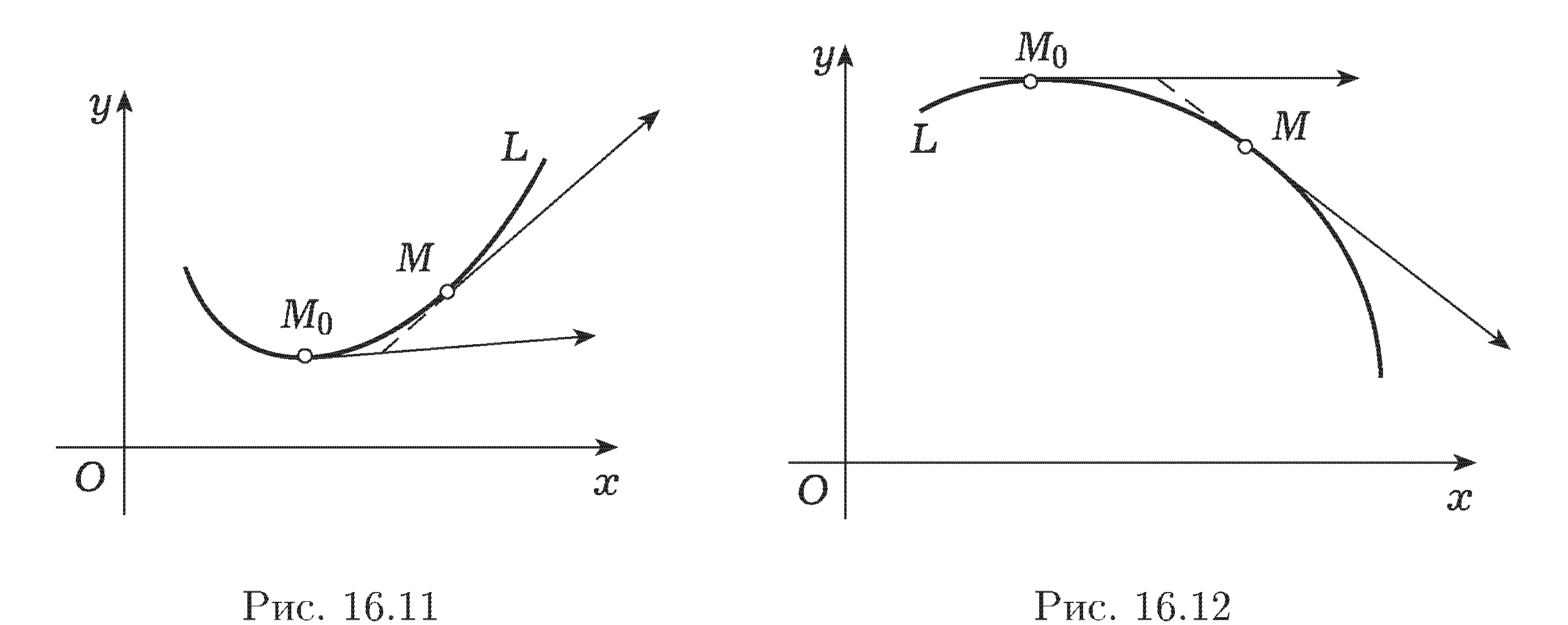


Рис. 16.11 Рис. 16.12

Введем далее понятие *средней кривизны участка кривой* M_0M. *Средней кривизной участка кривой* M_0M *назовем отношение угла смежности этого участка к длине этого участка.*

Так как точку M_0 кривой L мы считаем фиксированной, то средняя кривизна участка M_0M будет функцией точки M или функцией параметра t. Эту функцию мы обозначим символом $\varkappa_{M_0}(M)$ или $\varkappa_{M_0}(t)$.

Естественно, возникает вопрос о рассмотрении предела этой функции при стремлении точки M вдоль кривой L к точке M_0 (или, что то же самое, при стремлении параметра t к t_0).

Определение. *Предельное значение средней кривизны участка кривой* M_0M *при стремлении точки* M *вдоль кривой к точке* M_0 *называется* к р и в и з н о й *в данной точке* M_0 *кривой* L *и обозначается символом* $k(M_0)$.

Таким образом, по определению

$$k(M_0) = \lim_{M \to M_0} \varkappa_{M_0}(M) = \lim_{t \to t_0} \varkappa_{M_0}(t).$$

Предоставим читателю самому убедиться в том, что: 1) как средняя кривизна любого участка прямой линии, так и кривизна в любой точке этой линии равны нулю, 2) как средняя кривизна любого участка окружности радиуса R, так и кривизна в любой точке этой окружности равны $1/R$.

Установим формулу для вычисления кривизны в любой точке произвольной кривой L.

2. Формула для вычисления кривизны. Пусть кривая L задана параметрическими уравнениями $x = x(t)$, $y = y(t)$, M_0 — некоторая фиксированная точка этой кривой, отвечающая значению параметра t_0. Предположим, что все точки кривой L из некоторой окрестности M_0 являются обыкновенными и что функции $x(t)$ и $y(t)$ имеют в точке t_0 вторые производные. При этих предположениях мы установим общую формулу для вычисления кривизны в точке M_0 кривой L.

Пусть $\dot{x}$ и $\ddot{x}$ — значения первой и второй производной функции $x = x(t)$ в точке t_0, а $\dot{x}+\Delta\dot{x}$ — значение первой производной этой функции в точке $t_0 + \Delta t$ (Δt — произвольное приращение параметра t). Таким образом, $\Delta\dot{x}$ — приращение первой производной функции $x = x(t)$. Пусть $\dot{y}$, $\ddot{y}$ и $\dot{y}+\Delta\dot{y}$ — соответствующие значения производных функции $y = y(t)$.

Если считать, что точка M_0, отвечающая значению параметра t_0, фиксирована, а точка M отвечает значению параметра $t = t_0 + \Delta t$, то угол смежности участка M_0M и длину этого участка можно рассматривать *как функции аргумента* Δt. Эти функции мы обозначим соответственно через $\alpha(\Delta t)$ и $l(\Delta t)$.

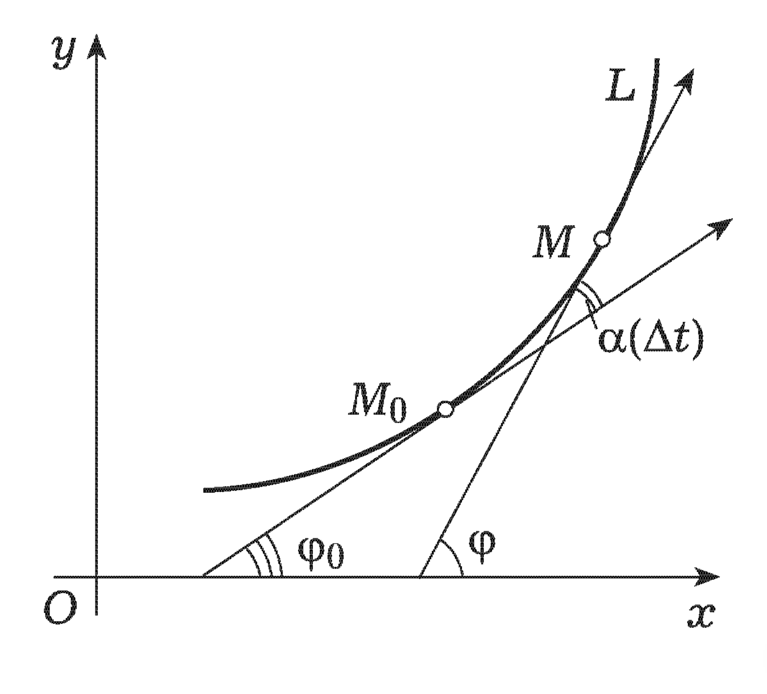


Рис. 16.13

По определению кривизна $k(M_0)$ в точке M_0 кривой равна предельному значению

$$k(M_0) = \lim_{\Delta t\to 0} \frac{\alpha(\Delta t)}{l(\Delta t)}. \qquad (16.31)$$

Докажем, что предельное значение (16.31) существует и вычислим это предельное значение.

Обозначим через φ_0 и φ углы наклона к оси Ox касательных к кривой L, проведенных через точки M_0 и M соответственно (рис. 16.13). Тогда, очевидно, при любом расположении точек M_0 и M для угла смежности $\alpha(\Delta t)$ будет справедливо соотношение

$$\alpha(\Delta t) = \varphi - \varphi_0.$$

Из последнего соотношения вытекает, что

$$\operatorname{tg}\alpha(\Delta t) = \frac{\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi_0}{1 + \operatorname{tg}\varphi\operatorname{tg}\varphi_0}. \qquad (16.32)$$

Исходя из геометрического смысла производной (см. п. 4 § 1 гл. 5) и из выражения для производной функции, заданной параметрически (см. § 11 гл. 5), мы можем записать

$$\operatorname{tg}\varphi_0 = \frac{\dot y}{\dot x}, \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{\dot y + \Delta\dot y}{\dot x + \Delta\dot x}.$$

Таким образом, формулу (16.32) можно переписать в виде

$$\operatorname{tg}\alpha(\Delta t) = \frac{\dfrac{\dot y + \Delta\dot y}{\dot x + \Delta\dot x} - \dfrac{\dot y}{\dot x}}{1 + \dfrac{\dot y(\dot y + \Delta\dot y)}{\dot x(\dot x + \Delta\dot x)}} = \frac{\dot x\cdot\Delta\dot y - \dot y\cdot\Delta\dot x}{\dot x(\dot x + \Delta\dot x) + \dot y(\dot y + \Delta\dot y)}. \qquad (16.33)$$

Поскольку функции $x = x(t)$ и $y = y(t)$ имеют в точке t_0 вторые производные, то первые производные этих функций в точке t_0 непрерывны и, стало быть,

$$\lim_{\Delta t\to 0}\Delta\dot y = 0, \qquad \lim_{\Delta t\to 0}\Delta\dot x = 0.$$

Но тогда, в силу равенства (16.33),

$$\lim_{\Delta t\to 0}\operatorname{tg}\alpha(\Delta t) = 0.$$

Из последнего равенства и из непрерывности арктангенса вытекает, что

$$\lim_{\Delta t\to 0}\alpha(\Delta t) = 0.$$

Поэтому справедливо равенство

$$\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\alpha(\Delta t)}{\operatorname{tg}\alpha(\Delta t)} = \lim_{\Delta t\to 0}\left[\cos\alpha(\Delta t)\frac{\alpha(\Delta t)}{\sin\alpha(\Delta t)}\right] = 1. \qquad (16.34)$$

Равенство (16.34) и теорема о предельном значении произведения сводит вопрос о вычислении предельного значения (16.31) к вычислению следующего предельного значения:

$$k(M_0) = \lim_{\Delta t\to 0} = \lim_{\Delta t\to 0}\frac{\operatorname{tg}\alpha(\Delta t)}{l(\Delta t)}. \qquad (16.35)$$

Для вычисления этого предельного значения заметим, что длина $l(\Delta t)$ участка кривой M_0M определяется формулой

$$l(\Delta t) = \int\limits_{t_0}^{t_0+\Delta t}\sqrt{\dot x^2(\tau) + \dot y^2(\tau)}\,d\tau.$$

Применив к интегралу, стоящему в правой части последнего равенства, формулу среднего значения, будем иметь

$$l(\Delta t) = \Delta t\sqrt{\dot x^2(t^*) + \dot y^2(t^*)}, \qquad (16.36)$$

где $t_0 \leqslant t^* \leqslant t_0 + \Delta t$.

Соотношения (16.35), (16.33) и (16.36) позволяют заключить, что вычисление кривизны сводится к вычислению предельного значения

$$k(M_0) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\dot{x}\dfrac{\Delta \dot{y}}{\Delta t} - \dot{y}\dfrac{\Delta \dot{x}}{\Delta t}}{[\dot{x}(\dot{x} + \Delta\dot{x}) + \dot{y}(\dot{y} + \Delta\dot{y})]\sqrt{\dot{x}^2(t^*) + \dot{y}^2(t^*)}}. \tag{16.37}$$

Так как функции $x = x(t)$ и $y = y(t)$ имеют в точке t_0 вторые производные, то существуют предельные значения

$$\lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\dot{x}}{\Delta t} = \ddot{x} \quad \text{и} \quad \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\dot{y}}{\Delta t} = \ddot{y}. \tag{16.38}$$

Далее, из непрерывности первых производных функций $x = x(t)$ и $y = y(t)$ заключаем, что

$$\lim_{\Delta t \to 0} \Delta\dot{x} = 0, \ \lim_{\Delta t \to 0} \Delta\dot{y} = 0, \ \lim_{\Delta t \to 0} \sqrt{\dot{x}^2(t^*) + \dot{y}^2(t^*)} = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}. \tag{16.39}$$

Из существования предельных значений (16.38) и (16.39) вытекает, что предельное значение, стоящее в правой части (16.37), существует и равно

$$\frac{\dot{x}\ddot{y} - \ddot{x}\dot{y}}{[\dot{x}^2 + \dot{y}^2]^{3/2}}.$$

Таким образом, мы доказали, что кривизна в точке M_0 кривой L существует и определяется формулой

$$k(M_0) = \frac{\dot{x}\ddot{y} - \ddot{x}\dot{y}}{[\dot{x}^2 + \dot{y}^2]^{3/2}}. \tag{16.40}$$

З а м е ч а н и е. Пусть требуется вычислить кривизну $k(M_0)$ в данной точке M_0 кривой L, *представляющей собой график дважды дифференцируемой функции* $y = f(x)$.

Положив в формуле (16.40) $x = t$, $y = f(t)$, мы получим для искомой кривизны следующую формулу:

$$k(M_0) = \frac{f''(x)}{[1 + (f'(x))^2]^{3/2}}.$$

Наконец, если кривая задана полярным уравнением $r = r(\theta)$, где $r(\theta)$ — дважды дифференцируемая функция полярного угла θ, то приняв за параметр t полярный угол θ и учитывая, что $x = r(\theta)\cos\theta$, $y = r(\theta)\sin\theta$, мы получим следующее выражение для кривизны:

$$k = \frac{r^2(\theta) + 2[r'(\theta)]^2 - r(\theta)r''(\theta)}{\{r^2(\theta) + [r'(\theta)]^2\}^{3/2}}.$$

В качестве примера вычислим кривизну в произвольной точке цепной линии $y = a \operatorname{ch} \dfrac{x}{a}$.

Поскольку

$$1 + [f'(x)]^2 = \operatorname{ch}^2 \frac{x}{a} = \frac{y^2}{a^2}, \ f''(x) = \frac{1}{a} \operatorname{ch} \frac{x}{a} = \frac{y}{a^2},$$

то кривизна равна

$$k = \frac{a}{y^2} = \frac{1}{a \operatorname{ch}^2 \dfrac{x}{a}}.$$

§ 4. Эволюта и эвольвента

1. Нормаль к плоской кривой. Пусть плоская кривая L задана посредством параметрических уравнений

$$x = \varphi(t), \quad y = \psi(t). \tag{16.41}$$

Будем считать, что кривая L не имеет точек самопересечения и участков самоналегания. Кроме того, будем считать, что каждая точка кривой L является обыкновенной [1]).

Введем понятие нормали к кривой в данной ее точке M.

Прямая, расположенная в плоскости кривой L и проходящая через точку M кривой перпендикулярно касательной к L в точке M, называется нормалью к L в точке M (рис. 16.14).

Рис. 16.14

Найдем уравнение нормали к кривой. Пусть x и y — координаты точки M кривой L, а X и Y– координаты любой точки N нормали к кривой. Согласно определению нормаль перпендикулярна касательной, и поэтому угловой коэффициент k_n нормали связан с угловым коэффициентом k_t касательной соотношением [2])

$$k_n k_t = -1. \tag{16.42}$$

Так как угловой коэффициент k_t касательной в случае параметрического задания кривой (16.41) равен $\dfrac{\psi'}{\varphi'}$, то из (16.42)

[1]) Отметим, что при этих условиях в каждой точке кривой L существует касательная.

[2]) Это соотношение известно из курса аналитической геометрии (см., например, выпуск «Аналитическая геометрия» настоящего курса).

получаем

$$k_n = -\frac{\varphi'}{\psi'}. \tag{16.43}$$

Используя известное из курса аналитической геометрии уравнение прямой с данным угловым коэффициентом k_n, получим следующее уравнение нормали к кривой L:

$$Y - y = -\frac{\varphi'}{\psi'}(X - x). \tag{16.44}$$

Учитывая, что $x = \varphi(t)$ и $y = \psi(t)$, перепишем уравнение (16.44) в следующей форме:

$$\varphi'(X - \varphi) + \psi'(Y - \psi) = 0. \tag{16.45}$$

З а м е ч а н и е. В случае если касательная в точке M параллельна оси абсцисс, ее угловой коэффициент k_t равен нулю, и поэтому соотношения (16.42), (16.43) и (16.44) не имеют смысла. Однако в этом случае уравнение (16.45) все же представляет собой уравнение нормали. Действительно, если $k_t = 0$ (касательная параллельна оси абсцисс), то $\psi' = 0$, а $\varphi' \neq 0$ [1]) и поэтому соотношение (16.44) принимает вид $X - \varphi = 0$. А это есть уравнение прямой, перпендикулярной оси Ox и отсекающей на оси Ox отрезок, равный φ. Ясно, что эта прямая совпадает в рассматриваемом случае с нормалью в точке M.

2. Эволюта и эвольвента плоской кривой. Пусть кривая L удовлетворяет тем же условиям, что и в предыдущем пункте. Обратимся к уравнению (16.45). Если в этом уравнении рассматривать t как параметр, то оно представляет собой уравнение *однопараметрического семейства всех нормалей* плоской кривой L. Представление о семействе нормалей плоской кривой дает рис. 16.15.

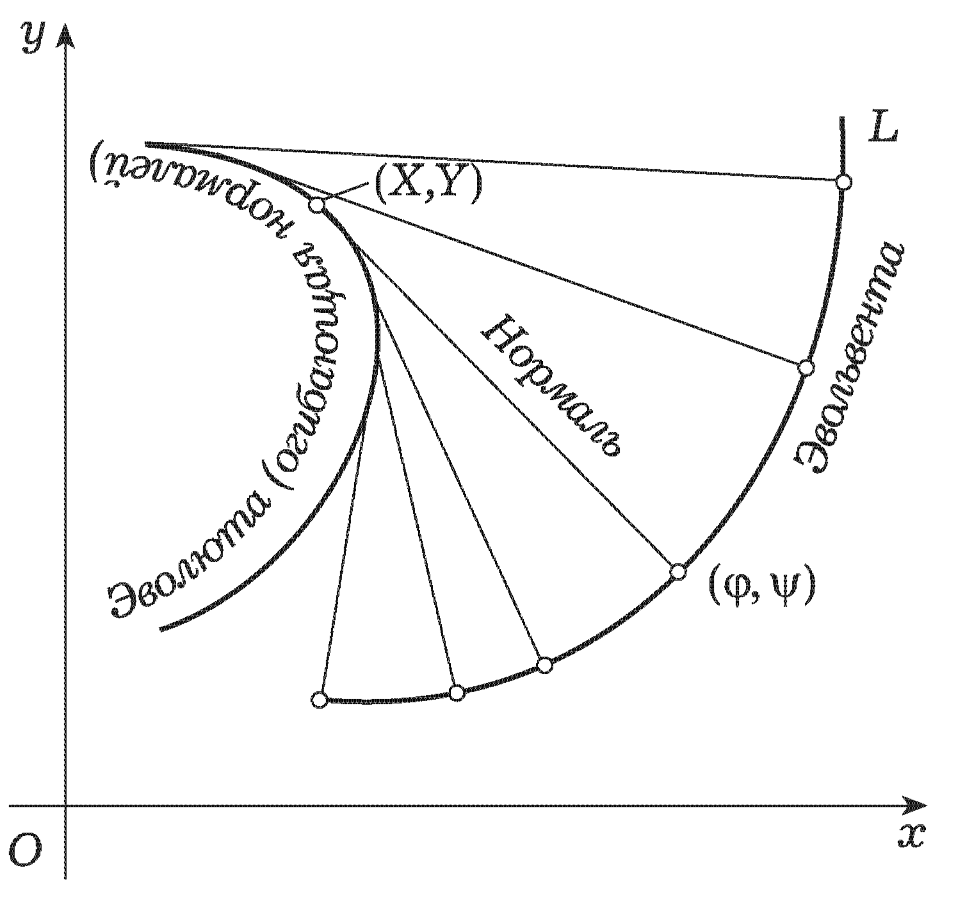


Рис. 16.15

При определенных условиях однопараметрическое семейство нормалей имеет огибающую, которая называется эволютой кривой L.

Итак, *э в о л ю т о й плоской кривой L называ-*

[1]) Напомним, что $k_t = \dfrac{\psi'}{\varphi'}$ и для обыкновенной точки $\varphi'^2 + \psi'^2 \neq 0$.

ется огибающая однопараметрического семейства нормалей этой кривой. Кривая L по отношению к своей эволюте называется э в о л ь в е н т о й.

Выясним условия существования эволюты плоской кривой L и найдем ее параметрические уравнения.

Будем считать, что кривая L без особых точек задана посредством параметрических уравнений (16.41). Для простоты предположим, что параметр t изменяется на интервале $(0,1)$. Допустим также, что функции $\varphi(t)$ и $\psi(t)$, фигурирующие в соотношениях (16.41), имеют непрерывные третьи производные на интервале $(0,1)$. При этих предположениях справедлива следующая теорема.

Теорема 16.4. *Пусть во всех точках кривой L ее кривизна k и производная кривизны*[1]) *не равны нулю. Тогда существует эволюта кривой L, причем параметрические уравнения эволюты имеют вид*

$$\begin{aligned} X &= \varphi - \frac{\varphi'^2 + \psi'^2}{\varphi'\psi'' - \varphi''\psi'}\psi', \\ Y &= \psi + \frac{\varphi'^2 + \psi'^2}{\varphi'\psi'' - \varphi''\psi'}\varphi'. \end{aligned} \tag{16.46}$$

Д о к а з а т е л ь с т в о. Мы определили эволюту как огибающую однопараметрического семейства нормалей кривой L. Это семейство задается уравнением (16.45). Таким образом, функция $F(X,Y,t)$, задающая семейство, определяется соотношением

$$F(X,Y,t) = \varphi'(X-\varphi) + \psi'(Y-\psi), \tag{16.47}$$

причем t играет роль параметра.

Применим теперь выводы § 1 этой главы о существовании огибающей для выяснения вопроса о существовании эволюты (т. е. огибающей семейства (16.45)). Мы должны проверить выполнение условий леммы п. 3 § 1 этой главы и условий теоремы 16.1. Перейдем к проверке указанных условий. Остановимся сначала на проверке условий леммы. Очевидно, при сформулированных требованиях на функции φ и ψ функции $F(X,Y,t)$ и $F'_t(X,Y,t)$ дифференцируемы. Убедимся теперь, что якобиан $\dfrac{D(F,F'_t)}{D(X,Y)}$ отличен от нуля. Используя выражение (16.40) для кривизны k кривой L, можно представить этот якобиан в следующей форме:

$$\frac{D(F,F'_t)}{D(X,Y)} = k[\varphi'^2 + \psi'^2]^{3/2}.$$

[1]) При условиях, наложенных на функции φ и ψ, кривизна k представляет собой дифференцируемую функцию параметра t.

По условию теоремы кривизна k отлична от нуля. Кроме того, так как все точки кривой L обыкновенные, то $\varphi'^2 + \psi'^2 \neq 0$. Таким образом, указанный якобиан отличен от нуля, и стало быть, все условия леммы выполнены.

Проверим теперь условия теоремы 16.1. Очевидно, что при сформулированных требованиях на функции φ и ψ производные F'_X, F'_Y, F''_{tX}, F''_{tY}, F''_{tt} непрерывны. Остается лишь убедиться в справедливости соотношения $F''_{tt} \neq 0$ для всех значений t из интервала $(0,1)$ и для характеристических точек на нормалях к кривой L.

Так как

$$F''_{tt} = \varphi'''(X-\varphi) + \psi'''(Y-\psi) - 3(\varphi'\varphi'' + \psi'\psi'') \tag{16.48}$$

и согласно п. 2 § 1 этой главы и формулам (16.13), характеристические точки для рассматриваемого случая определяются соотношениями

$$\begin{gathered} \varphi'(X-\varphi) + \psi'(Y-\psi) = 0, \\ \varphi''(X-\varphi) + \psi''(Y-\psi) - (\varphi'^2 + \psi'^2) = 0, \end{gathered} \tag{16.49}$$

то значение производной F''_{tt} в характеристических точках в силу (16.48) и (16.49) равно

$$F''_{tt} = \frac{\varphi'\psi''' - \varphi'''\psi'}{\varphi'\psi'' - \varphi''\psi'}(\varphi'^2 + \psi'^2) - 3(\varphi'\varphi'' + \psi'\psi''). \tag{16.50}$$

Обратимся к выражению (16.40) для кривизны k кривой L. С учетом обозначений (16.41) из формулы (16.40) путем дифференцирования получаем

$$k' = \frac{\varphi'\psi'' - \varphi''\psi'}{[\varphi'^2 + \psi'^2]^{5/2}} \left\{ \frac{\varphi'\psi''' - \varphi'''\psi'}{\varphi'\psi'' - \varphi''\psi'}(\varphi'^2 + \psi'^2) - 3(\varphi'\varphi'' + \psi'\psi'') \right\}.$$

С помощью этого соотношения и выражения (16.40) для кривизны придадим выражению (16.50) следующую форму:

$$F''_{tt} = \frac{k'}{k}(\varphi'^2 + \psi'^2).$$

Так как по условию теоремы k и k' не равны нулю и, кроме того, $\varphi'^2 + \psi'^2 \neq 0$, то из последнего выражения для F''_{tt} следует, что для всех значений t из интервала $(0,1)$ и для характеристических точек на нормалях к L $F''_{tt} \neq 0$. Таким образом, условия теоремы 16.1 также выполнены.

Найдем теперь параметрические уравнения эволюты. Так как при сформулированных условиях эволюта есть геометрическое место характеристических точек семейства нормалей, то координаты X и Y точек эволюты определяются из соотношений

(16.49). Находя из этих соотношений X и Y, мы и получим параметрические уравнения (16.46). Теорема доказана.

Замечание. В геометрии часто используются понятия радиуса кривизны и центра кривизны. *Радиусом R кривизны кривой L* называется величина $1/k$, где k — кривизна L, а *центром кривизны* — та точка нормали к кривой, которая отстоит от данной точки кривой L в направлении вогнутости L на расстояние R.

Отметим, что радиус кривизны кривой равен радиусу соприкасающейся окружности, а центр кривизны совпадает с центром соприкасающейся окружности.

Убедимся, что *эволюта представляет собой геометрическое место центров кривизны кривой.* В самом деле, из соотношений (16.46) получаем

$$(X-\varphi)^2+(Y-\psi)^2=\frac{1}{k^2}=R^2,$$

т. е. точка эволюты с координатами (X,Y) отстоит от точки кривой L с координатами (φ,ψ) на расстоянии R. Из геометрического смысла эволюты (см. рис. 16.15) ясно, что точка (X,Y) расположена на нормали в сторону вогнутости кривой L.

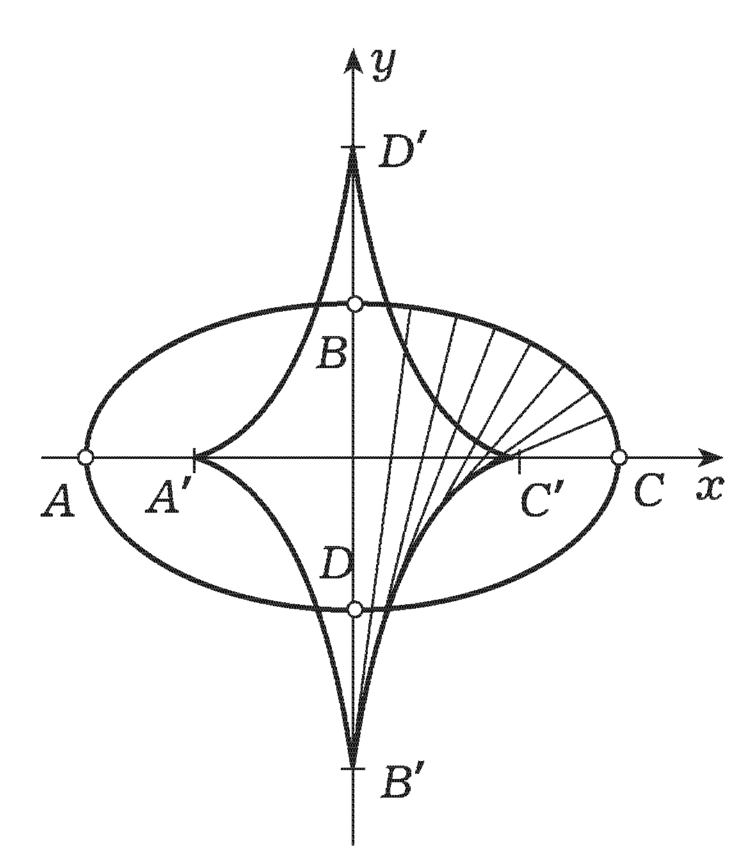


Рис. 16.16

Пример. Найдем уравнения эволюты эллипса $ABCD$ (рис. 16.16), определяемого параметрическими уравнениями

$$x=\varphi(t)=a\cos t,\quad y=\psi(t)=b\sin t.$$

Так как $\varphi'=-a\sin t$, $\psi'=b\cos t$, $\varphi''=-a\cos t$, $\psi''=-b\sin t$, то $\varphi'^2+\psi'^2=a^2\sin^2 t+b^2\cos^2 t$, а $\varphi'\psi''-\varphi''\psi'=ab$. Поэтому, согласно (16.46), параметрические уравнения эволюты эллипса имеют вид

$$X=\frac{a^2-b^2}{a}\cos^3 t,\quad Y=\frac{b^2-a^2}{b}\sin^3 t.$$

Таким образом, *эволюта эллипса* представляет собой так называемую *удлиненную астроиду* (см. рис. 16.16).

Отметим, что в точках A, B, C, D эллипса (т. е. в его вершинах) производная кривизны равна нулю. Поэтому в этих точках не выполнены условия теоремы 16.4. В соответствующих точках A', B', C', D' эволюта эллипса имеет особенности — так называемые точки возврата.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ВЕЩЕСТВЕННЫХ ЧИСЕЛ

В гл. 2 для введения вещественных чисел мы использовали множество бесконечных десятичных дробей. Определив для множества этих дробей правила сравнения, сложения и умножения, мы установили, что элементы этого множества обладают 13 *основными свойствами* (перечисленными в п. 1 § 1 гл. 2 для рациональных чисел). Описанный метод введения вещественных чисел, хотя и обладает несомненными эвристическими и методическими достоинствами, не является единственно возможным. Можно было бы ввести вещественные числа с помощью бесконечных двоичных дробей, с помощью так называемых дедекиндовых сечений в области рациональных чисел [1]), с помощью последовательностей рациональных чисел [2]) и другими методами. Чтобы выяснить взаимосвязь между различными методами введения вещественных чисел, привлечем некоторые новые понятия и установим еще одно важное свойство множества изученных нами вещественных чисел.

1. Полнота множества вещественных чисел. Два множества, для элементов каждого из которых определены правила сравнения, сложения и умножения, мы будем называть *изоморфными друг другу относительно этих правил*, если между элементами этих множеств можно установить взаимно однозначное соответствие [3]) так, что если элементам a и b первого множества

---

[1]) Способ введения вещественных чисел с помощью сечений принадлежит немецкому математику Р. Дедекинду (1831–1916). Этот способ изложен, например, в гл. I книги Ф. Франклина «Математический анализ» или в гл. I книги Г.М. Фихтенгольца «Основы математического анализа».

[2]) Этот способ введения вещественных чисел принадлежит Г. Кантору. Его изложение можно найти в книге В.В. Немыцкого, М.И. Слудской и А.Н. Черкасова «Курс математического анализа», том I, гл. 2.

[3]) По поводу взаимно однозначного соответствия между элементами двух множеств см. сноску [1]) на с. 91.

соответствуют элементы a' и b' второго множества, то: 1) элементы a' и b' связаны тем же знаком ($>$, $<$ или $=$), что и элементы a и b; 2) элементу $a+b$ соответствует элемент $a'+b'$; 3) элементу $a \cdot b$ соответствует элемент $a' \cdot b'$.

Аналогично можно было бы говорить не о правилах сравнения, сложения и умножения, а о каких-либо других правилах, характеризующих соотношения между элементами, и ввести понятие множеств, изоморфных друг другу относительно указанных правил.

Примером двух множеств, изоморфных друг другу относительно правил сравнения, сложения и умножения, могут служить множество рациональных чисел, введенных в виде отношения целых чисел, с правилами сравнения, сложения и умножения, указанными в сносках на с. 38, и множество рациональных чисел, записанных в виде бесконечных десятичных дробей, с обычными правилами сравнения, сложения и умножения вещественных чисел.

Рассмотрим более внимательно два множества: множество всех рациональных чисел и множество всех вещественных чисел. Для каждого из этих множеств определены правила сравнения, сложения и умножения и справедливы 13 основных свойств. Вместе с тем ясно, что множество всех вещественных чисел является более «широким», чем множество всех рациональных чисел, ибо *в целом множество всех вещественных чисел не изоморфно относительно правил сравнения, сложения и умножения множеству всех рациональных чисел*[1], *но в множестве вещественных чисел можно выделить часть, изоморфную относительно указанных правил множеству всех рациональных чисел.*

Естественно, возникает вопрос, нельзя ли и для множества всех вещественных чисел построить более «широкое» множество объектов, обладающее следующими свойствами: 1) в этом более «широком» множестве определены правила сравнения, сложения и умножения и справедливы 13 основных свойств; 2) в целом более «широкое» множество не изоморфно относительно указанных правил множеству всех вещественных чисел; 3) в более «широком» множестве можно выделить часть, изоморфную относительно указанных правил множеству всех вещественных чисел.

Мы докажем, что такого более «широкого» множества *не существует*, т. е., как принято говорить в математике, *множе-*

[1] Это вытекает из того, что между множеством всех рациональных чисел и всех вещественных чисел нельзя установить взаимно однозначного соответствия (см. п. 6 § 4 гл. 3).

ство всех вещественных чисел является п о л н ы м *относительно правил сравнения, сложения и умножения и 13 основных свойств.*

Вообще *произвольное множество объектов, для которого определены некоторые правила и справедливы некоторые свойства, называется полным относительно этих правил и свойств, если нельзя построить более «широкое» множество объектов такое, чтобы:* 1) *в этом более «широком» множестве были определены те же правила и справедливы те же свойства;* 2) *в целом это более «широкое» множество не было изоморфно данному относительно указанных правил;* 3) *в этом более «широком» множестве существовала часть, изоморфная данному множеству относительно указанных правил.*

Можно утверждать, что множество всех рациональных чисел *не является полным относительно правил сравнения, сложения и умножения и 13 основных свойств*, ибо существует более «широкое» множество (множество вещественных чисел), удовлетворяющее требованиям 1), 2) и 3) из только что сформулированного определения.

Докажем теперь, что *множество всех вещественных чисел является полным относительно правил сравнения, сложения и умножения и 13 основных свойств.*

Предположим противное, т. е. предположим, что существует более «широкое» множество объектов $\{x'\}$ такое, что: 1) для элементов множества $\{x'\}$ определены правила сравнения, сложения и умножения и справедливы 13 основных свойств, 2) в целом множество $\{x'\}$ не изоморфно относительно указанных правил множеству $\{x\}$ всех вещественных чисел, 3) существует часть множества $\{x'\}$ (обозначим ее символом $\{\bar{x}'\}$), изоморфная относительно указанных правил множеству $\{x\}$ всех вещественных чисел.

Заметим, прежде всего, что у множества $\{x'\}$ существует *единственная пара* элементов $0'$ и $1'$, играющих особую роль нуля и единицы [1]). Далее, можно утверждать, что элементы $0'$ и $1'$ входят в состав множества $\{x'\}$ и находятся во взаимно однозначном соответствии с вещественными числами 0 и 1 [2]). Пусть

---

[1]) Если бы нашлось два элемента $0'_1$ и $0'_2$,играющих особую роль нуля, то, в силу свойств суммы, мы получили бы $0'_1 = 0'_1 + 0'_2 = 0'_2 + 0'_1 = 0'_2$, т. е. $0'_1 = 0'_2$. Аналогично доказывается единственность элемента $1'$, играющего особую роль единицы.

[2]) Докажем, например, что элемент $0'$ входит в состав множества $\{\bar{x}'\}$ и находится во взаимно однозначном соответствии с вещественным числом 0. Предположим, что вещественному числу 0 соответствует некоторый элемент θ' множества $\{\bar{x}'\}$, и пусть a' — любой элемент этого множества, соот-

α' — какой-либо элемент множества $\{\bar{x}'\}$, *не принадлежащий* множеству $\{\bar{x}'\}$.

В силу правила сравнения мы можем разбить все элементы $\bar{x}'$ множества $\{\bar{x}'\}$ на *два класса — верхний и нижний*, отнеся к верхнему классу все элементы $\bar{x}'$, удовлетворяющие неравенству $\bar{x}' > \alpha'$, а к нижнему классу все элементы $\bar{x}'$, удовлетворяющие неравенству $\bar{x}' < \alpha$. Оба эти класса не являются пустыми. В самом деле, докажем, например, что верхний класс не пуст. Повторив элемент $1'$ слагаемым достаточное число раз, мы, в силу свойства 13°, получим элемент n' множества $\{\bar{x}'\}$, удовлетворяющий неравенству $n' > \alpha'$, т. е. принадлежащий верхнему классу. Из свойства 1° вытекает, что *каждый элемент нижнего класса меньше любого элемента верхнего класса.* В силу изоморфизма множества $\{\bar{x}'\}$ и множества $\{x\}$ всех вещественных чисел можно утверждать, что множество всех вещественных чисел также разбивается на два класса, причем каждое число из нижнего класса меньше любого числа из верхнего класса. Но это означает, что *нижний класс вещественных чисел ограничен сверху и имеет* (в силу теоремы 2.1) *точную верхнюю грань* m, а верхний класс имеет точную нижнюю грань M. Из определения точных граней вытекает, что обе грани m и M заключены между вещественными числами, как угодно близкими между собой, а поэтому $m = M$. Так как число $m = M$ является одним из вещественных чисел, то оно принадлежит одному из классов, т. е. *существует либо наименьший элемент в верхнем классе, либо наибольший элемент в нижнем классе.* Докажем, что оба эти утверждения абсурдны. Пусть (ради определенности) существует наименьший элемент в верхнем классе вещественных чисел. Тогда существует наименьший элемент m' и в верхнем классе, отвечающем разбиению множества $\{\bar{x}'\}$. По определению верхнего класса $m' > \alpha'$. Согласно свойствам суммы существует разность $m' - \alpha'$, причем, согласно этим свойствам, $m' - \alpha' > 0'$. Но тогда, в силу свойства 9°, для элемента $m' - \alpha'$ существует обратный, который, в силу свойств произведения, равен частному $\dfrac{1'}{m' - \alpha'}$. Согласно свойству 13° элемент $1'$ можно повторить слагаемым столько раз, что полученный при этом «целый» элемент n' будет принадлежать $\{\bar{x}'\}$ и удовлетворять неравенству $n' > \dfrac{1'}{m' - \alpha'}$. Из последнего неравенства, в силу свойств произ-

---

ветствующий вещественному числу a. В силу изоморфности относительно сложения элементу $a' + \theta'$ соответствует вещественное число $a + 0 = a$, т. е. элемент $a' + \theta'$ совпадает с элементом a', но это означает, что θ' (единственный!) нулевой элемент, т. е. $\theta' \equiv 0'$. Аналогично проводятся рассуждения и для единичного элемента.

ведения и суммы, получим [1])

$$m' - \frac{1'}{n'} > \alpha'. \qquad (\text{П.1})$$

Так как элементы m', $1'$ и n' принадлежат множеству $\{\bar{x}'\}$, то и элемент $\left(m' - \frac{1'}{n'}\right)$ также принадлежит этому множеству и, очевидно, удовлетворяет неравенству $m' - \frac{1'}{n'} < m'$. Но тогда неравенство (П.1) означает, что *в верхнем классе имеется элемент, меньший m', т. е. m' не является наименьшим элементом.* Полученное противоречие доказывает полноту множества вещественных чисел.

2. Аксиоматическое введение множества вещественных чисел. Полное логическое завершение наших представлений о вещественных числах дает аксиоматический метод введения этих чисел. Этот метод заключается в следующем.

Множество вещественных чисел вводится как совокупность объектов любой природы, удовлетворяющих 17 аксиомам, в качестве которых берутся правила сравнения, сложения и умножения[2]*), 13 основных свойств и аксиома о полноте относительно указанных правил и свойств.*

Указанные 17 аксиом обычно называют *аксиомами вещественного числа.* Конкретной реализацией совокупности объектов, удовлетворяющих 17 аксиомам вещественного числа, является изученное нами в гл. 2 множество бесконечных десятичных дробей. Возможны и другие реализации указанной совокупности объектов [3]). Полное выяснение вопроса о связи между этими реализациями дает следующее замечательное утверждение.

Любая реализация $\{x'\}$ совокупности объектов, удовлетворяющих 17 аксиомам вещественного числа, изоморфна относительно правил сравнения, сложения и умножения изученному выше множеству $\{x\}$ бесконечных десятичных дробей.

Доказательство. Ради удобства разобьем доказательство на отдельные пункты.

1°. Прежде всего, заметим, что аксиомы гарантируют существование у множества $\{x'\}$ элементов $0'$ и $1'$, играющих особую

---

[1]) Эти свойства обеспечивают применимость всех правил алгебры.

[2]) Постулируется лишь факт существования правил сравнения, сложения и умножения. Конкретный вид этих правил при этом не указывается.

[3]) Мы уже указывали во введении к настоящему приложению, что вещественные числа могут быть введены различными способами (с помощью бесконечных двоичных дробей, с помощью так называемых дедекиндовых сечений и другими способами).

роль нуля и единицы. В силу аксиомы Архимеда $1' > 0'$ [1]). Выделим у множества $\{x'\}$ совокупность «рациональных объектов». Для этого заметим, что любое рациональное число может быть получено из чисел 0 и 1 посредством операций сложения, вычитания и деления. В самом деле, повторяя число 1 слагаемым нужное число раз, получим любое положительное целое число n; вычитая из числа 0 число 1 нужное число раз, мы получим любое отрицательное целое число; делением двух целых чисел получим любое рациональное число. Так как в множестве $\{x'\}$, согласно аксиомам, определены операции сложения, вычитания и деления, то с помощью этих операций получим из $0'$ и $1'$ все «рациональные объекты». Эти объекты мы будем обозначать теми же символами, что и рациональные числа, но снабжать штрихами.

Докажем, что построенная нами совокупность «рациональных объектов» множества $\{x'\}$ изоморфна относительно правил сравнения, сложения и умножения совокупности рациональных чисел множества $\{x\}$. В самом деле, поставим в соответствие рациональному числу m/n «рациональный объект» m'/n'. Из способа построения «рациональных объектов» вытекает, что сумме и произведению рациональных чисел m/n и p/q соответствует сумма и произведение «рациональных объектов» m'/n' и p'/q'. Остается убедиться в том, что m'/n' и p'/q' связаны тем же знаком, что и m/n и p/q. Поскольку при нашем построении «рациональных объектов» правило сравнения любых «рациональных объектов» посредством умножения на «целые объекты» сводится к сравнению «целых объектов», то нам достаточно убедиться в том, что для любых «целых объектов» m' и n' $m' > n'$ при $m > n$. Для того чтобы убедиться в этом, достаточно в силу аксиом доказать, что $(n+1)' > n'$. Последнее вытекает из того, что $1' > 0'$ и, стало быть,

$$(n+1)' = n' + 1' > n' + 0' = n'.$$

2°. Пусть теперь a' — любой объект множества $\{x'\}$. Покажем, что *этому объекту можно поставить в соответствие вполне определенную «бесконечную десятичную дробь»* . Ради определенности предположим, что $a' > 0'$. В силу аксиомы Архимеда из «целых объектов», строго меньших a', найдется наибольший объект, который мы обозначим через a'_0; из тех «рациональных объектов»

$$a'_0, 0'; a'_0, 1'; \ldots ; a'_0, 9',$$

[1]) В самом деле, если бы было верно противоположное неравенство $1' \leqslant 0'$, то из него, в силу аксиом, мы получили бы $1'+1'+\ldots+1' \leqslant 0'+0'+\ldots+0' = 0'$ (сколько бы раз число $1'$ ни было повторено слагаемым), а это противоречит аксиоме Архимеда.

которые строго меньше a', найдется наибольший объект, который мы обозначим через a_0', a_1', и т. д.

Таким путем мы поставим в соответствие любому объекту бесконечную совокупность «рациональных объектов»

$$a_0'; a_0', a_1'; \ldots ; a_0', a_1' \ldots a_n'; \ldots , \tag{П.2}$$

или, что то же самое, «бесконечную десятичную дробь»

$$a_0', a_1' a_2' \ldots a_n' \ldots \tag{П.3}$$

Те же рассуждения справедливы и для $a' < 0'$, но в этом случае как все объекты (П.2), так и «бесконечная десятичная дробь» (П.3) будут иметь знак минус.

Из построения совокупности объектов (П.2) очевидно, что для любого номера n справедливы неравенства

$$a_0', a_1' a_2' \ldots a_n' < a' \leqslant a_0', a_1' a_2' \ldots a_n' + \frac{1'}{(10^n)'}, \tag{П.4}$$

т. е. любой объект a' заключен между двумя «рациональными объектами», разность между которыми $\dfrac{1'}{(10^n)'}$ может быть сделана меньше любого наперед взятого «положительного» объекта [1]).

3°. Докажем теперь, что *если два объекта a' и b' могут быть заключены между двумя «рациональными объектами» α' и β' ($\beta' > \alpha'$), разность между которыми $\beta' - \alpha'$ может быть сделана меньше любого наперед взятого «положительного» объекта, то $a' = b'$*. Предположим, что $a' \neq b'$. Пусть, например, $a' < b'$. Тогда $\alpha' \leqslant a' < b' \leqslant \beta'$. Из этих неравенств, в силу аксиом, получим

$$0' < b' - a' \leqslant \beta' - \alpha'. \tag{П.5}$$

Но тогда для объекта $b' - a'$ найдется обратный $\dfrac{1'}{b' - a'}$, а для него найдется «целый объект» n' такой, что

$$n' > \frac{1'}{b' - a'},$$

так что

$$\frac{1'}{n'} < b' - a'.$$

Сопоставляя последнее неравенство с (П.5), получим

$$\frac{1'}{n'} < \beta' - \alpha',$$

---

[1]) В самом деле, для любого объекта $\varepsilon' > 0'$ в силу аксиом существует обратный элемент $\dfrac{1'}{\varepsilon'}$, а для него найдется «целый объект» n' такой, что $n' > \dfrac{1'}{\varepsilon'}$, так что $\dfrac{1'}{(10^n)'} < \dfrac{1'}{n'} < \varepsilon'$.

что противоречит тому, что разность $\beta' - \alpha'$ может быть сделана меньше любого наперед взятого «положительного» объекта.

4°. Убедимся в том, что *двум неравным объектам множества $\{x'\}$ ставятся в соответствие различные «бесконечные десятичные дроби»*. В самом деле, предположим, что двум объектам из $\{x'\}$ ставится в соответствие одна и та же «бесконечная десятичная дробь» (например, (П.3)). Тогда в силу неравенств (П.4) оба эти объекта могут быть заключены между «рациональными объектами», разность между которыми может быть сделана меньше любого наперед взятого «положительного» объекта. На основании п. 3° рассматриваемые объекты равны. Доказанное утверждение оправдывает представление любого объекта множества $\{x'\}$ «бесконечной десятичной дробью».

5°. Согласно первым трем аксиомам для объектов множества $\{x'\}$ определены правила сравнения сложения и умножения. Докажем, что *если все объекты множества $\{x'\}$ представить «бесконечными десятичными дробями», то для этих «дробей» правила сравнения и определения суммы и произведения формулируются точно так же, как для обычных бесконечных десятичных дробей, изученных выше.*

Пусть a' и b' — любые два объекта множества $\{x'\}$, и пусть этим объектам соответствуют «бесконечные десятичные дроби» [1])

$$a'_0, a'_1 \ldots a'_n \ldots \text{ и } b'_0, b'_1 \ldots b'_n \ldots \tag{П.6}$$

Прежде всего выясним правило сравнения объектов a' и b', представленных в виде «бесконечных десятичных дробей» (П.6). Достаточно доказать следующие два утверждения: 1) если дроби (П.6) совпадают, т. е. если

$$a'_0 = b'_0, \quad a'_1 = b'_1, \quad \ldots, \quad a'_n = b'_n, \quad \ldots,$$

то объекты a' и b' равны; 2) если найдется номер n такой, что справедливы соотношения

$$a'_0 = b'_0,\ a'_1 = b'_1,\ \ldots,\ a'_{n-1} = b'_{n-1},\ a'_n < b'_n, \tag{П.7}$$

то объекты a' и b' связаны неравенством $a' < b'$.

Утверждение 1) уже доказано в п. 4°. Докажем утверждение 2). Последнее из соотношений (П.7) можно переписать в виде

$$a'_n + 1' \leqslant b'_n.$$

Пользуясь этим соотношением и остальными соотношениями (П.7) и записывая для a' правое из неравенств (П.4), а для b'

[1]) При установлении правила сравнения можно ограничиться случаем «положительных» объектов a' и b', ибо общий случай сводится к этому случаю с помощью правила знаков.

левое из неравенств (П.4), будем иметь

$$a' \leqslant a_0',\ a_1' \ldots a_{n-1}' a_n' + \frac{1'}{(10^n)'} = a_0', a_1' \ldots a_{n-1}'(a_n' + 1') \leqslant \\ \leqslant a_0',\ a_1' \ldots a_{n-1}' b_n' < b', \text{ т. е. } a' < b'.$$

Докажем теперь, что для объектов a' и b' справедливы те же определения суммы и произведения, что и для обычных вещественных чисел. Ограничимся случаем суммы. Пусть α_1', α_2', β_1' и β_2' — всевозможные «рациональные объекты», удовлетворяющие неравенствам

$$\alpha_1' \leqslant a' \leqslant \alpha_2', \quad \beta_1' \leqslant b' \leqslant \beta_2'. \tag{П.8}$$

Тогда сумма $a' + b'$ объектов a' и b' представляет собой единственный объект, удовлетворяющий неравенствам

$$\alpha_1' + \beta_1' \leqslant a' + b' \leqslant \alpha_2' + \beta_2'. \tag{П.9}$$

В самом деле, из аксиом вытекает возможность почленного сложения неравенств, а отсюда следует, что сумма $a'+b'$ удовлетворяет неравенствам (П.9). Кроме того, эта сумма является единственным объектом, удовлетворяющим неравенствам (П.9), ибо каждая из разностей

$$\alpha_2' - \alpha_1' \quad \text{и} \quad \beta_2' - \beta_1',$$

а стало быть, и разность

$$(\alpha_2' + \beta_2') - (\alpha_1' + \beta_1')$$

может быть сделана меньше любого наперед взятого «положительного» объекта (в силу п. 2°). Аналогично рассматривается случай произведения.

6°. Докажем, наконец, что множество $\{x'\}$ изоморфно множеству вещественных чисел, представимых бесконечными десятичными дробями. Предположим, что множество $\{x'\}$ не изоморфно $\{x\}$. Объекту a', представимому «бесконечной десятичной дробью» a_0', $a_1' a_2' \ldots$, поставим в соответствие вещественное число $a = a_0, a_1 a_2 \ldots$ Пусть двум объектам a' и b' соответствуют вещественные числа a и b.

Из результатов п. 5 вытекает, что 1) a' и b' связаны тем же знаком, что и числа a и b, 2) сумме $a' + b'$ соответствует сумма $a + b$; 3) произведению $a' \cdot b'$ соответствует произведение $a \cdot b$[1]).

Так как по предположению $\{x'\}$ не изоморфно $\{x\}$, то при указанном соответствии не каждому вещественному числу отвечает некоторый элемент множества $\{x'\}$. Это означает, что

[1]) Ибо сравнение, сложение и умножение объектов a' и b' и вещественных чисел a и b определяются одними и теми же правилами.

множество $\{x'\}$, будучи не изоморфным всему множеству $\{x\}$, является изоморфным части множества $\{x\}$, что противоречит полноте множества $\{x'\}$.

Полученное противоречие завершает доказательство утверждения.

3. Заключительные замечания. В заключение заметим, что аксиоматический метод и понятие изоморфных (относительно различных правил) совокупностей объектов широко используются в разнообразных разделах современной математики и физики (при построении геометрии, теории вероятностей, классической механики, статистической физики, квантовой механики [1]) и других разделов).

Например, в геометрии множество точек прямой вводится как совокупность объектов, удовлетворяющих некоторым аксиомам, среди которых фундаментальную роль играет аксиома о полноте этой совокупности относительно остальных аксиом. Упомянутые аксиомы позволяют установить взаимно однозначное соответствие между множеством всех точек прямой и множеством всех вещественных чисел [2]). Это соответствие позволяет изображать вещественные числа точками на прямой (числовой оси), чем широко пользуются в курсе анализа в иллюстративных целях.

---

[1]) Так, квантовая механика первоначально возникла в виде двух внешне различных теорий: «Матричной механики» Гейзенберга и «Волновой механики» Шредингера. Позже было доказано, что эти две теории используют две изоморфные друг другу конкретные реализации одной общей совокупности объектов, вводимой аксиоматически и называемой абстрактным гильбертовым пространством (см. по этому поводу часть 2 настоящего курса).

[2]) См. Приложение к выпуску 3 настоящей серии «Аналитическая геометрия» и в более подробном изложении книгу Н.В. Ефимова «Высшая геометрия», изд. 1961 г., § 20–23.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Учебное издание

ИЛЬИН Владимир Александрович,
ПОЗНЯК Эдуард Генрихович

ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Часть I

Серия «Курс высшей математики и математической физики»

Редакторы *М.М. Горячая, Д.А. Миртова*
Оригинал-макет: *Ст.Ю. Мельников*

ЛР №071930 от 06.07.99
Подписано в печать 01.09.04. Формат 60×90/16
Бумага офсетная №1. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 40,5. Уч.-изд. л. 43,4.
Заказ №

Издательская фирма
«Физико-математическая литература»
МАИК «Наука/Интерпериодика»
117997, Москва, Профсоюзная ул., 90
E-mail: fizmat@maik.ru, fmlsale@maik.ru; http://www.fml.ru

Отпечатано с готовых диапозитивов
в ФГУП «Ивановская областная типография»
153008, г. Иваново, ул. Типографская, 6

ISBN 5-9221-0536-1

